

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

**HIDRODINAMIČKI I TEHNOLOŠKI ASPEKTI  
KAPE BRODSKOG VIJKA**

Voditelj rada:  
Prof.dr.sc. Nastia Degiuli

Dražen Ević

Zagreb 2014. g.

## Sažetak rada:

Kapa broorskog vijka je dio broorskog propulzijskog sustava koji pored svoje osnovne funkcije zaštite spoja vijka sa pogonskim vratilom može imati značajni utjecaj na sveukupni učinak propulzije broda. Ovisno o složenosti pojedinog tehničkog rješenja kapa može varirati od vrlo jednostavnog strojnog dijela do kompleksnoga sustava koji može drastično promijeniti hidrodinamiku strujanja iza pogorskoga vijka broda.

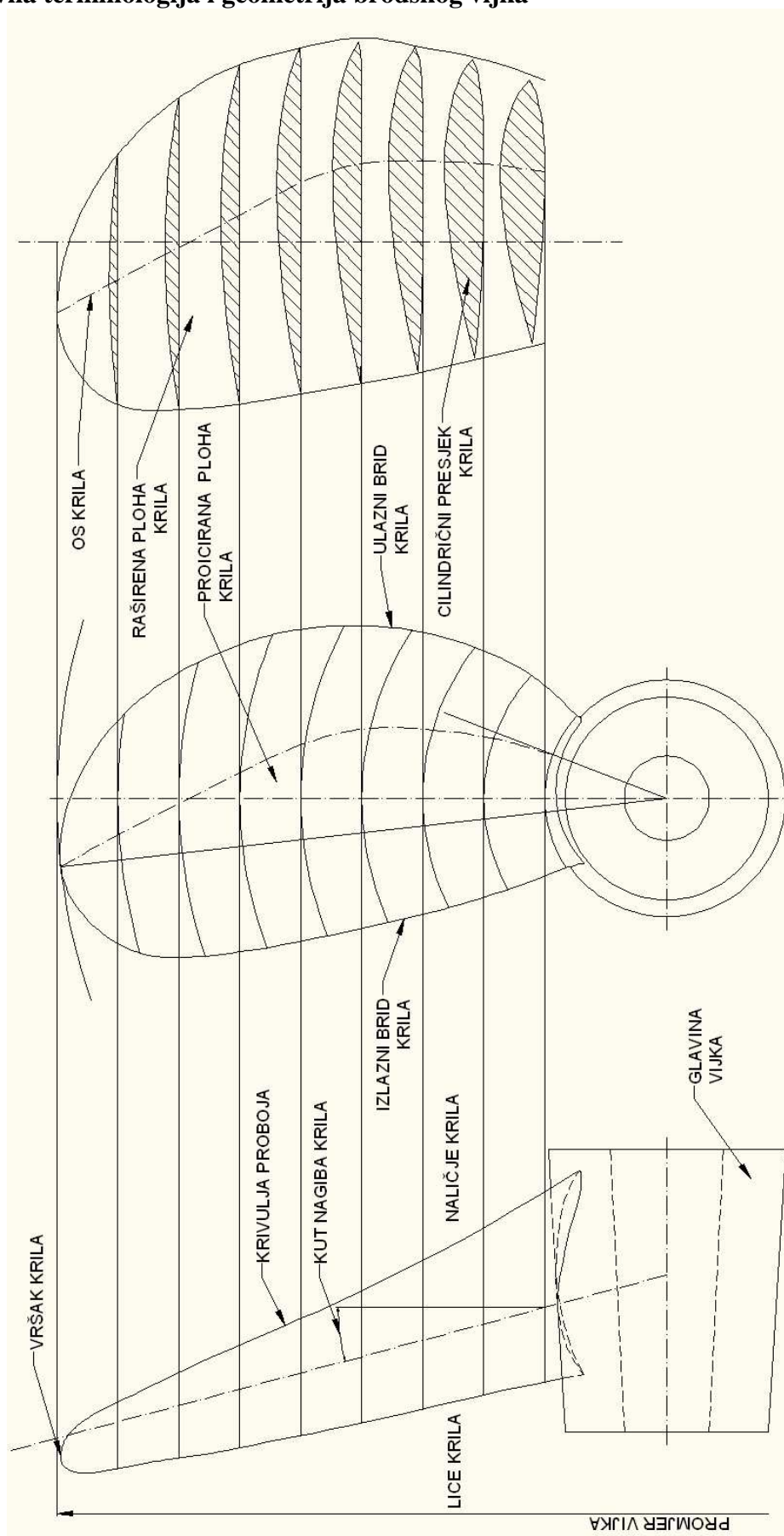
Ovaj rad se, uz pregled poznatih rješenja kape broorskog vijka, ponajprije fokusira na tehnologiju izrade jednostavnijih izvedbi kape optimiziranih za lakšu i ekonomičniju proizvodnju tehnologijom lijevanja.

## Sadržaj:

1. Hidrodinamika brodskog vijka i kape brodskog vijka	1
1.1. Osnovna terminologija i geometrija brodskog vijka	1
1.2. Hidrodinamička svojstva vijka	3
1.3. Hidrodinamika sklopa vijka i kape vijka, te kavitacija na kapi	8
1.4. Utjecaj tehnologije izrade kape brodskog vijka na pogon broda	9
2. Kape brodskih vijaka	11
2.1. Funkcija kape brodskog vijaka	11
2.2. Varijacije u dizajnu kape brodskog vijka	12
2.3. Materijal za izradu kapa brodskih vijaka	16
3. Tehnološka razrada lijevanja kape brodskog vijka	17
3.1. Tehnološka razrada crteža odljevka	17
3.2. Model i jezgrenik	17
3.3. Projektiranje ljevačkog kalupa	23
3.3.1. Masa i volumen odljeva	23
3.3.2. Napajanje odljeva	23
3.3.3 Projektiranje uljevnog sistema	27
3.3.4. Odabir kalupnica	31
3.3.5. Armatura jezgre i kalupa	32
3.3.6. Fiksiranje jezgre i kalupnica	33
3.4. Materijal za lijevanje	34
3.5. Bilanca utroška radnog vremena	35
4. Opis postupka lijevanja kape brodskog vijka	36
4.1. Postupak kalupljenja	36
4.1.1. Priprema CO <sub>2</sub> pijeska	36
4.1.2. Priprema premaza za kalup	36
4.1.3. Formiranje pješčanog kalupa i jezgre	36
4.2. Priprema šarže i taljenje materijala	50
4.3. Ulijevanje taline	52
4.4. Čišćenje	52
5. Strojna obrada odljeva	54
6 Greške nastale prilikom lijevanja	58

# 1. Hidrodinamika broskog vijka i kape broskog vijka

## 1.1. Osnovna terminologija i geometrija broskog vijka



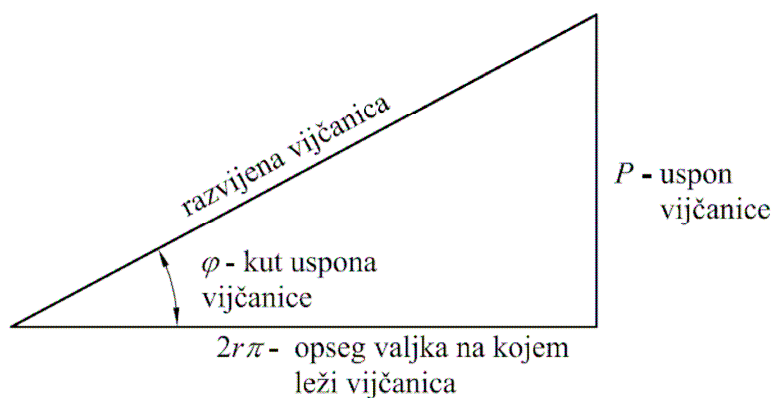
Slika 1. Nacrt broskog vijka

Brodski vijak ima lice (tlačna strana) i naličje (usisna ili podtlačna strana), te se sastoji od glavine koja stvara spoj krila vijka sa pogonskim vratilom, te tako osigurava prijenos snage na krila, te krila koji tvore uzgonski element broskog vijka.

Najvažniji parametri geometrije vijka su:

$D$ [m]	- promjer vijka
$d$ [m]	- promjer glavine vijka
$Z$	- broj krila
$P$ [m]	- uspon
$P/D$	- odnos uspona i promjera vijka
$A_e/A_o$	- odnos ukupne površine krila i površine diska broskog vijka

Krila vijka prate vijčane plohe, odnosno vijčane linije u obliku uspravne spirale koja se omata oko osi vijka. Razvijanjem te vijčanice možemo dobiti kut uspona vijčanice.

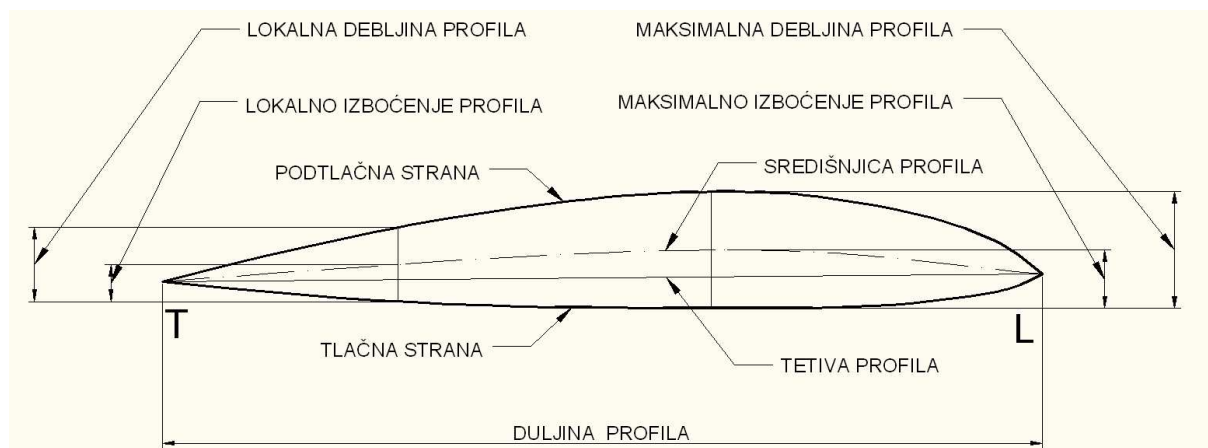


Slika 2. Trokut uspona razvijene vijčanice

Na trokutu se vidi kut uspona koji je ovisan o promjeru vijka i njegovu usponu.

$$\varphi = \arctg \frac{P}{\pi \cdot D}$$

Sama krila broskog vijka imaju svoju zasebnu geometriju koja se opisuje cilindričnim presjecima profila krila na raznim radijusima. Sam oblik tih profila ovisi o tipu i namjeni broskog vijka. Na slici 3 je prikazan tipičan bikonveksni nesimetrični profil.

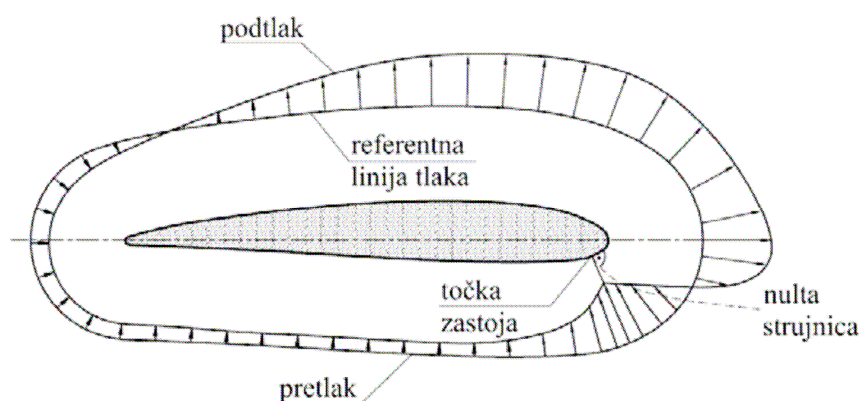


Slika 3. Presjek profila krila

## 1.2. Hidrodinamička svojstva vijka

Brodski vijak je reaktivni brodski propulzor koji pretvara mehaničku energiju sa brodskog pogonskog vrtila u hidrodinamičku silu pogona broda. To se postiže rotacijskim gibanjem krila brodskog vijka kroz vodu.

Krilo, kao i svako tijelo koje se giba kroz viskozni fluid, stvara polje hidrodinamičkih tlakova na svojoj površini. To polje tlakova daje neku rezultantnu hidrodinamičku silu na krilo. Komponentu te sile koja djeluje u smjeru nastrujavanja fluida zovemo hidrodinamički otpor  $D$  (drag), a komponentu okomitu na smjer nastrujavanja fluida zovemo hidrodinamički uzgon  $L$  (lift). Uz to te sile stvaraju i određeni moment  $M$  na profil.



Slika 4. Raspored tlakova na profil krila uzrokovan nastrujavanjem viskoznog fluida preko tog profila (Sambolek: Propulzija broda)

Za profile jedinične širine profila iznos tih sila i momenata možemo odrediti prema sljedećim formulama:

$$D = C_D \cdot c \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

$$L = C_L \cdot c \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

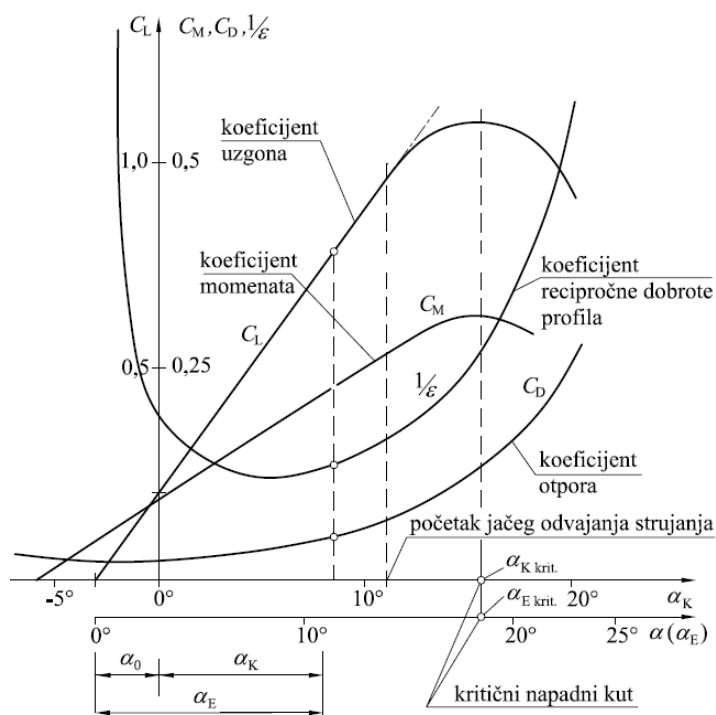
$$M = C_M \cdot c^2 \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}$$

$D$ [N]	- sila otpora
$L$ [N]	- sila uzgona
$M$ [Nm]	- moment hidrodinamičkih sila
$v$ [m/s]	- brzina nastrujavanja fluida
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	- gustoća fluida
$c$ [m]	- dužina tetive profila
$C_D$	- bezdimenzionalni koeficijent otpora
$C_L$	- bezdimenzionalni koeficijent uzgona
$C_M$	- bezdimenzionalni koeficijent momenta

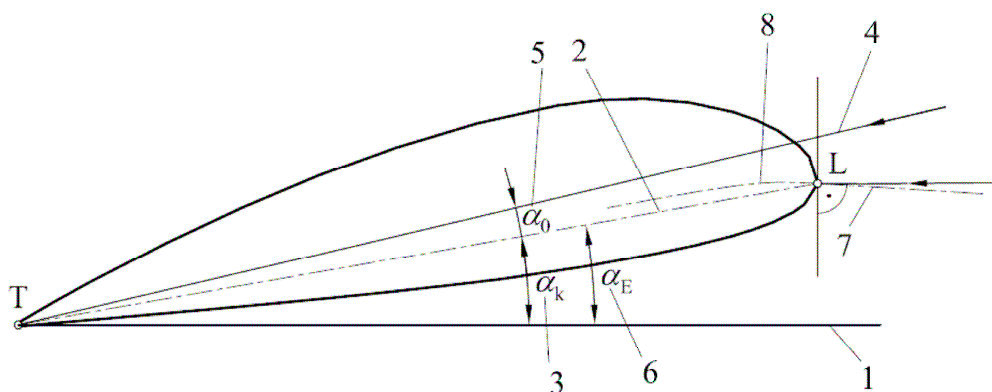
Uz to možemo definirati i koeficijent kvalitete profila  $\varepsilon$  ovisno o odnosu uzgona i otpora koji profil stvara.

$$\varepsilon = \frac{L}{D} = \frac{C_L}{C_D}$$

Bezdimenzionalni koeficijenti su funkcija smjera nastrujavanja fluida na profil kako je to prikazano na slici 5.

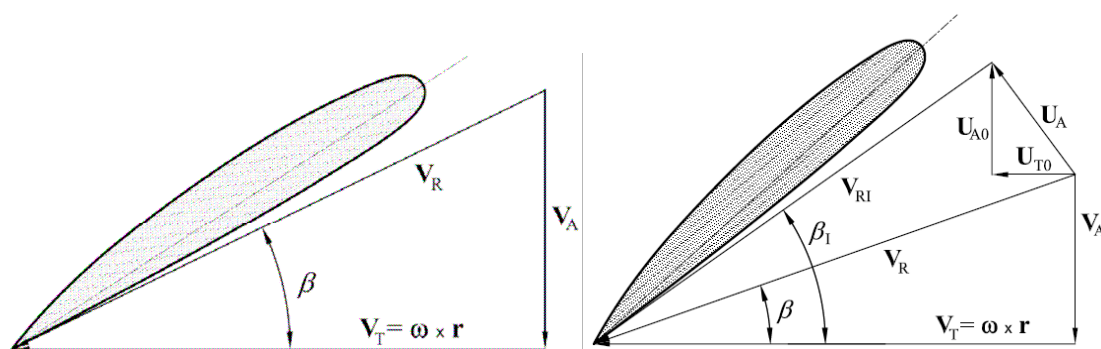


Slika 5. Primjer ovisnost hidrodinamičkih koeficijenta o kutu nailaska fluida, odnosno napadnom kutu (Sambolek: Propulzija broda)



Slika 6. Definicije kutova nastrujavanja fluida na profil sa zanemarenim induciranim brzinama fluida: 1 – smjer neporemećenoga strujanja, 2 – tetiva profila, 3 – geometrijski napadni kut, 4 – smjer nultog uzgona, 5 – kut nultoga uzgona, 6 – hidrodinamički napadni kut, 7 – nulta strujnica, 8 – središnjica profila, L – ulazni brid profila, T – izlazni brid profila (Samboleak: Propulzija broda)

Iz toga je očito da će uzgon i otpor krila brodskog vijka, pored njegove geometrije i veličine, ovisiti i o kutu nastrujavanja fluida na njegova krila. Taj kut nastrujavanja fluida je određen aksialnom brzinom fluida, i brzinom rotacije brodskog vijka. Uz to kod jače opterećenih vijaka, zbog razlike tlakova na tlačnoj i podltačnoj strani krila, dolazi do pojave induciranih strujanja fluida  $U_A$  okomitih na tetivu profila, koji dodatno utječu na kut nastrujavanja.



Slika 7. i 8. Kutovi nastrujavanja fluida na krila za lako (lijeva slika) i teško (desna slika) opterećenog brodskog vijka. (Samboleak: Propulzija broda)

Iz slike 7. i 8. vidi da razlika kutova nastrujavanja  $\beta$  i kuta uspona vijčanice  $\varphi$  iz slike 2. daje napadni kut nastrujavanja fluida na profila krila  $\alpha_k$ . Praktičniji način opisivanja kuta nastrujavanja fluida je pomoću bezdimenzionalnog koeficijenta napredovanja  $J$ .

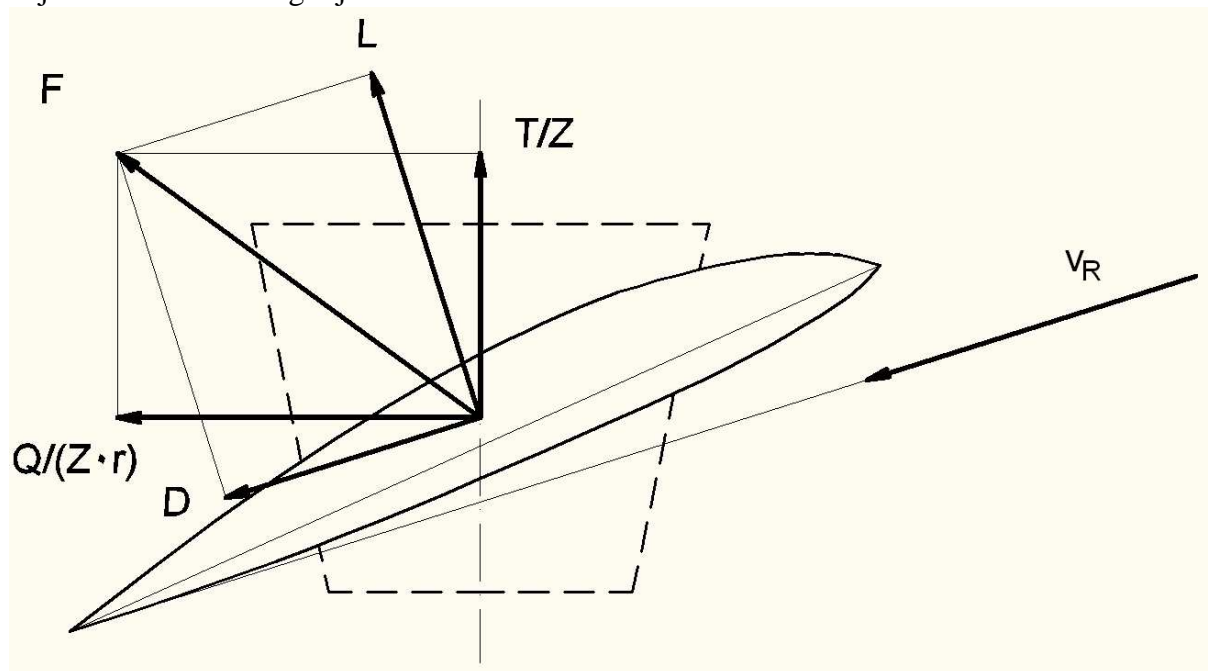
$$J = \frac{v_A}{n \cdot D}$$

Gdje je:

$v_A$ [m/s]	- brzina napredovanja, odnosno brzina broda umanjena za utjecaj sustrujanja
$n$ [°/s]	- broj okretaja brodskog vijka
$D$ [m]	- promjer vijka



Rezultantna sila na svako krilo se može rastaviti na komponente koje djeluju aksialno na os broskog vijka, i komponente koje djeluju tangencijalno. Aksialne komponente tvore potisak broskog vijka, dok tangencijalne sile, pomnožene sa radijusom njihovog hvatišta na krilima, daju moment broskog vijka.



Slika 8. Sile koje djeluju na pojedino krilo broskog vijka.

Tako možemo definirati:

$Q/(Z \cdot r)$  [N] - tangencijalna sila na krilo vijka sa hvatištem sile na radijusu  $r$

$T/Z$  [N] - sila poriva ostvarena po krilu vijka

$Q$  [Nm] - moment na vijku

$T$  [N] - poriv vijka

$Q$  i  $T$  obično izražavamo i u bezdimenzionalnim koeficijentima poriva  $K_T$  i momenta  $K_Q$ .

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad - \text{koeficijent momenta}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad - \text{koeficijent poriva}$$

Gdje je:

$n$  [°/s] - broj okretaja broskog vijka

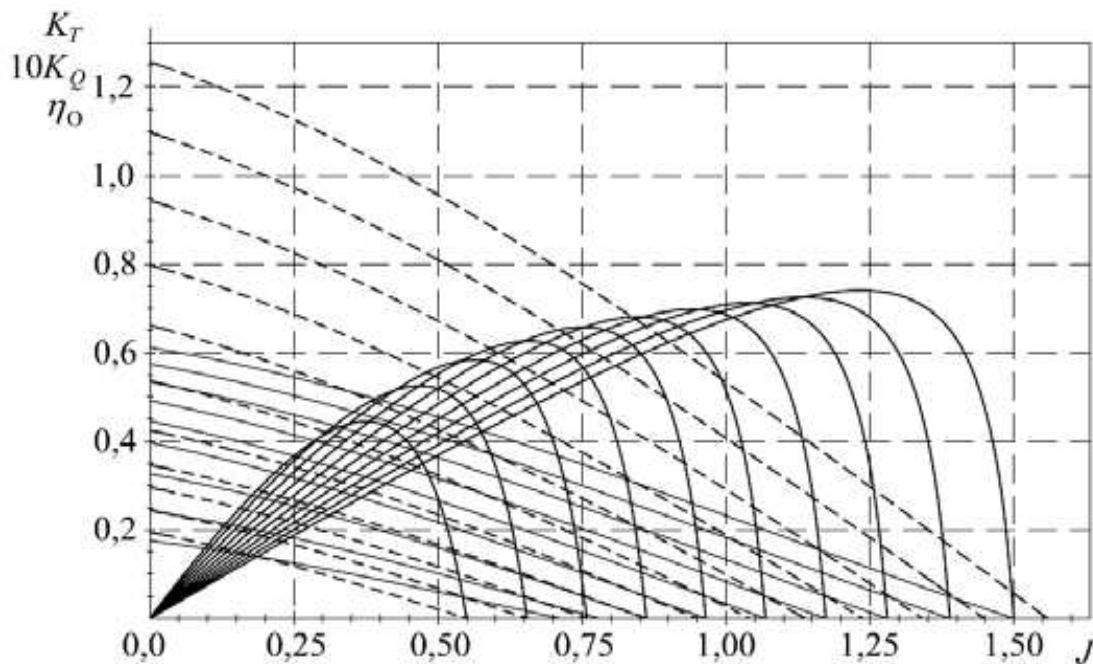
$D$  [m] - promjer vijka

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] - gustoća fluida

Iz dijagrama u slici 5. već znamo da je otpor i uzgon krila funkcija napadnoga kuta nastrujavanja vode pa slijedi da će moment i poriv brodskog vika biti funkcija koeficijenta napredovanja  $J$  kojim opisujemo taj napadni kut nastrujavanja. Ti se odnosi prikazuju u dijagramu slobodne vožnje vika kao funkcije  $K_Q(J)$  i  $K_T(J)$ .

Budući da moment  $Q$  pomnožen sa kutnom brzinom vijka predstavlja uloženu snagu u pogon broda  $P_Q$ , a poriv  $T$  pomnožen sa brzinom napredovanja  $v_A$  daje korisnu snagu poriva  $P_T$ , možemo dobiti korisnost vijka u slobodnoj vožnji  $\eta_o(J)$  prema sljedećoj formuli:

$$\eta_o = \frac{P_T}{P_Q} = \frac{T \cdot v_A}{2 \cdot n \cdot \pi \cdot Q} = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q}$$



Slika 9. dijagrami slobodne vožnje za seriju vijka tipa WB5.70.  $K_T$  krivulje su crtane punom crtom,  $10 \cdot K_Q$  isprekidanom. Masno su ucrtane krivulje korisnost vijka u slobodnoj vožnji  $\eta_o$ . (Samboleak: Propulzija broda)

Sam učinak propulzije nije samo ovisan o radu brodskog vika već i o ostalim faktorima konstrukcije trupa broda i brodskog pogona. Ukupnu efikasnost brodske propulzije označavamo sa  $\eta_T$ .

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_M} = \eta_H \cdot \eta_o \cdot \eta_R \cdot \eta_S \cdot \eta_M$$

Gdi je:

$$P_T = T \cdot v_A \quad \text{- snaga poriva}$$

$$P_M \quad \text{- snaga brodskog pogonskog motora}$$

$$\eta_H \quad \text{- utjecaj trupa}$$

$$\eta_o \quad \text{- korisnost vijka u slobodnoj vožnji}$$

$\eta_R$	- koeficijent prijelaza
$\eta_S$	- korisnost osovinskog voda
$\eta_M$	- mehanička korisnost brodskog motora

### 1.3. Hidrodinamika sklopa vijka i kape vijka, te kavitacija na kapi

Kapa normalne izvedbe u normalnom režimu rada ima minimalni utjecaj na brodski vijak jer se u normalnim slučajevima propulzije ona se nalazi iza hidrodinamičkog traga vijka, te ne može značajno utjecati na profil strujanja na vijku, svakako ne u mjeri u kojoj to radi brodski trup.

Manje značajni izuzetak je vožnja u krmu, kada će kod tipičnih izvedbi brodske propulzije fluid prije nailaska na vijak dolaziti u kontakt samo sa kapom vijka i kormilom. U tom slučaju najznačajnija pojava je drastično smanjen utjecaj sustrujanja  $w$  na funkciju brodskog vijka jer male dimenzije i površina kormila i kape, u usporedbi sa veličinom trupa pri vožnji u pramac, imaju drastično manji utjecaj na smanjenje brzine nastrujavanja fluida. Sa druge strane vožnja u krmu značajno povećava efekt upijanja  $t$  na trupu. Kombinacija povećanja upijanja i smanjenja sustrujanja pri vožnji u krmu rezultira i smanjenjem vrijednosti stupnja utjecaja trupa  $\eta_H$  na propulziju.

$$\eta_H = \frac{(1 - t)}{(1 - w)}$$

Uz smanjenu vrijednosti utjecaja trupa dolazi i do pada učinka vijka jer je vijak optimiziran za rad pri vožnji u pramac i pri određenom profilu sustrujanja koji je pri vožnji u krmu promijenjen. Zbog tih faktora vožnja u krmu će rezultirati značajnim padom efikasnosti brodske propulzije.

Dok je utjecaj kape na hidrodinamiku vijka minimalan utjecaj vijka na hidrodinamiku kape je značajan.

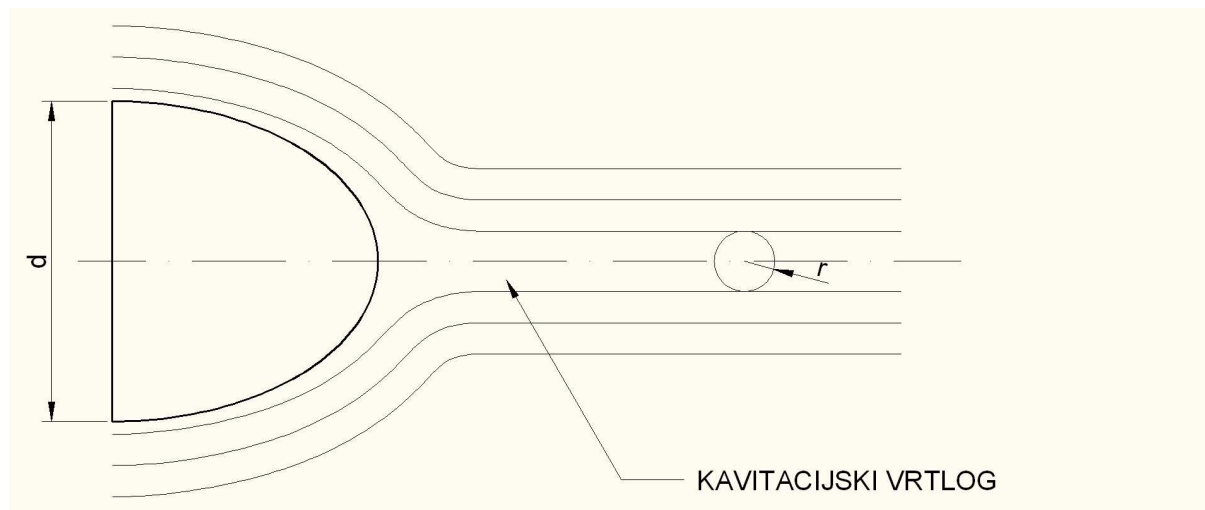
Manje bitan faktor utjecaja vijka na kapu je otpor nastao zbog trenja. Kod jednostavnih izvedbi kapa se nalazi iza same glavine u hidrodinamičkoj sjeni. Uz samu glavinu brzina strujanja fluida iza vijka je najmanja, te budući da otpor trenja raste sa kvadratom brzine sam položaj kape minimizira otpor trenja koji on može generirati. Uz to jednostavnije kape imaju minimalnu površinu nastrujavanja te tako dodatno smanjuju trenje koje generiraju.

Sa druge strane veoma značajan hidrodinamički efekt kojeg kapa i brodski vijak stvaraju je podtlačna zona na površini kape, koji rezultira povećanjem otpora (manifestira se kao povećanje koeficijenta upijanja  $t$ ), te stvaranjem kavitacijskih vrtloga iza kape brodskog vijka.

Glavni krivac za tu pojavu je tangencijalna komponenta brzine u vrtlogu kojeg rotacija brodskog vijka ostavlja iza sebe. Kako fluid struji preko površine kape tako se smanjuje i promjer oko kojeg se rotacija vrtloga događa, sa promjera glavine na početku kape, do nule na kraju kape. Pri tom smanjenju radijusa rotacije u vrtlogu, zbog zakona o očuvanju količine gibanja mase, fluid će nastojati očuvati istu tangencijalnu brzinu bez obzira na radijus rotacije. To dovodi do povećanja centrifugalne sile koja djeluje na rotirajuću česticu fluida.

$$a = \frac{v^2}{r} \quad - \text{akceleracija mase koja rotira brzinom } v \text{ na radiusu } r$$

Sa formule vidimo da kako se sloj fluida koji struji uz samu kapi približava kraju kape on, teoretski, postiže beskonačnu akceleraciju. Naravno to je fizikalno nemoguće jer na određenom promjeru rotacije centrifugalna sila postiže ekevilibrium sa vanjskim hidrostatskim pritiskom fluida, te će se nakon tog radijusa sužavanje promjera rotacije usporiti na mjeru koju to dopušta pad tangencijalne komponente brzine uslijed viskoznosti fluida.



Slika10. Skica kavitacijskog vrtloga nastalog na kapi brodskog vijka

Što je promjer kape veći, te što je tangencijalna brzina strujanja veća, to će biti veći promjer nastalog kvitacijskog vrtloga. Isto tako će rasti i dodatni otpor stvoren podtlakom na kapi.



Slika 11. i 12. Kavitacijski vrtlozi na brodskim vijcima nastali zbog djelovanja centrifugalne sile.

Na slikama 12. i 13. se vidi da su osim na kapi slični kavitacijski vrtlozi nastali i na vrhovima krila jer svako krilo također iza sebe stvara vrtlog . Sa slika se također vidi da je centralni kavitacijski vrtlog na kapi veći i postojaniji od vrtloga koji nastaju na vrhovima krila.

#### 1.4. Utjecaj tehnologije izrade kape brodskog vijka na pogon broda

Zbog malog utjecaja otpora trenja kod izvedbe kape fokus na čišću hidrodinamičku formu kape, i glatku površinu, nije nužan. On čak može biti i štetan jer nam je u interesu izazvati određene turbulencije koje će brže prigušiti tangencijalna strujanja i tako smanjiti njihov negativni učinak. To objašnjavanja zašto mnoge moderne izvedbe kape brodskih vijaka imaju izrazito jednostavnu formu nehidrodinamičkog tipa, koje se fokusiraju na jednostavnost tehnološke izvedbe i montaže.

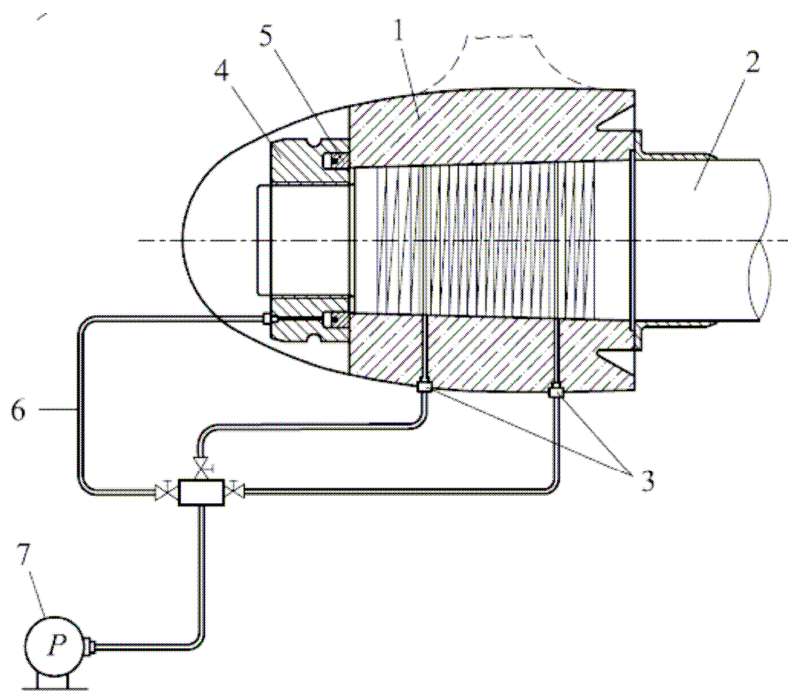
Utjecaj tangencijalnih brzina strujanja na kapu toliko je značajan da kod većine specijalnih izvedbi kapa fokus je na smanjenju njihovog utjecaja. Komplicirane izvedbe sa krilcima i krilima koje su sa tehnološkoga stanovišta puno teže za proizvesti, te stvaraju dodatni otpor trenja, mogu biti ekonomski isplative ako dovoljno smanje dodatni otpor izazvan tangencijalnim strujanjem. Povećani troškovi izrade tih složenijih izvedbi se vraćaju kroz životni vijek broda uštedom goriva.

## 2. Kape brodskih vijaka

### 2.1. Funkcija kape brodskog vijaka

Primarna funkcija kape brodskog vijka je zaštita spoja glavine vijka sa rukavcem pogonskoga vratila. Taj spoj može biti oštećen kavitacijom, korozijom, obraštanjem, te mehaničkim silama i udarima u toku plovidbe, dokovanja ili pomorskih nesreća.

U toku životnog vijeka broda moguće je da će se brodski vijak morati više puta skidati za rukavca pogonskoga vratila. Razlog tome može biti zamjena vijka oštećenog kavitacijom ili nekom pomorskom nezgodom, ili zamjena nekim novim efikasnijom izvedbom vijka. Mogući razlog skidanja može biti i čišćenje obraslog vijka. Ukoliko je prilikom eksploatacije broda došlo do oštećenja spoja vijka i vratila odvajanje može biti otežano, te sam proces nasilnog odvajanja glavine sa oštećenog spoja može izazvati dodatna oštećenja na vijku i vratilu. Ukoliko su oštećenja vratila velika tako da se ne mogu popraviti na doku potrebno je uklanjanje cijelog pogonskoga vratila iz statvene cijevi za popravak u radionici, ili kompletnu zamjenu novim vratilom. Radi izbjegavanja svih tih problema i troškova sa održavanjem broda važno je zaštititi spoj glavine vijka i vratila.



Slika 13. Pričvršćenje vijka na osovinu bez klina; 1 - glavina vijka, 2 – vratilo vijka, 3 – priključci za dovod ulja pod tlakom, 4 – matica, 5 – prstenasti klip, 6 – cijev za dovod ulja, 7 – uljna crpka (Samboleak: Propulzija broda)

Sekundarna funkcija kape brodskog vijka je kontrola strujanja iza brodskog vijaka u cilju postizanja boljeg iskorištenja pogonskog sustava i efikasnijeg rada kormila. Uobičajene izvedbe brodskih vijaka ostavljaju iza sebe seriju jakih vrtloga. Samo stvaranje tih vrtloga predstavlja beskoristan utrošak energije brodskog pogona, a uz to stvaraju podtlak na kapi koji smanjuje efikasnost propulzije, i otežavaju rad kormila se nalazi u mlazu brodskog vijka. Uz to ti vrtlozi stvaraju kavitacijske tragove koji mogu oštetiti kormilo. Zbog toga su se razvile razne izvedbe brodskih kapa koje nastoje smanjiti vrtloženje iza brodskog vijka, te iskoristiti energiju tih vrtloga za poboljšanje ukupne efikasnosti propulzije.



## 2.2. Varijacije u dizajnu kape brodskog vijka

### Zastarjela izvedba kape sa zaobljenim profilom



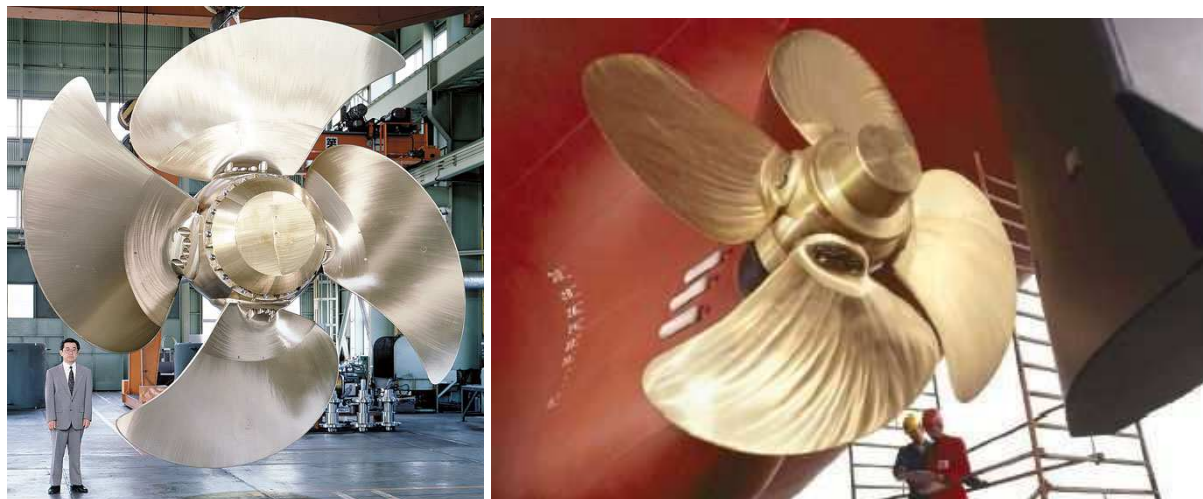
Slika 14 Vijak sa tradicionalnim profilom kape



Slika 15. Odljevak zastarjelog profila kape. Sa kape nije uklonjeno centralo pojio.

Dugo vremena nakon uvođenja brodskog vijka kao glavne metode modernog brodskog pogona kape brodskih vijaka su izrađivane u izduženoj i zaobljenoj hidrodinamičkoj formi. Očito je bilo vjerovanje da će takve zaobljene forme stvarati manji otpor strujanju vode. No sa razvojem moderne hidrodinamike, te novih metoda ispitivanja rada brodskih vijaka, kao što su kavitacijski tuneli, ustanovljeno je da takvi profili kapa ne doprinose boljem radu brodskog pogona, te potpomažu stvaranju jačeg centralnog kavitacijskog vrtloga.

### **Moderna izvedba kape odsječenog profila**



Slike 16. i 17. Primjeri jednostavnih kapa brodskih vijaka modernog tipa

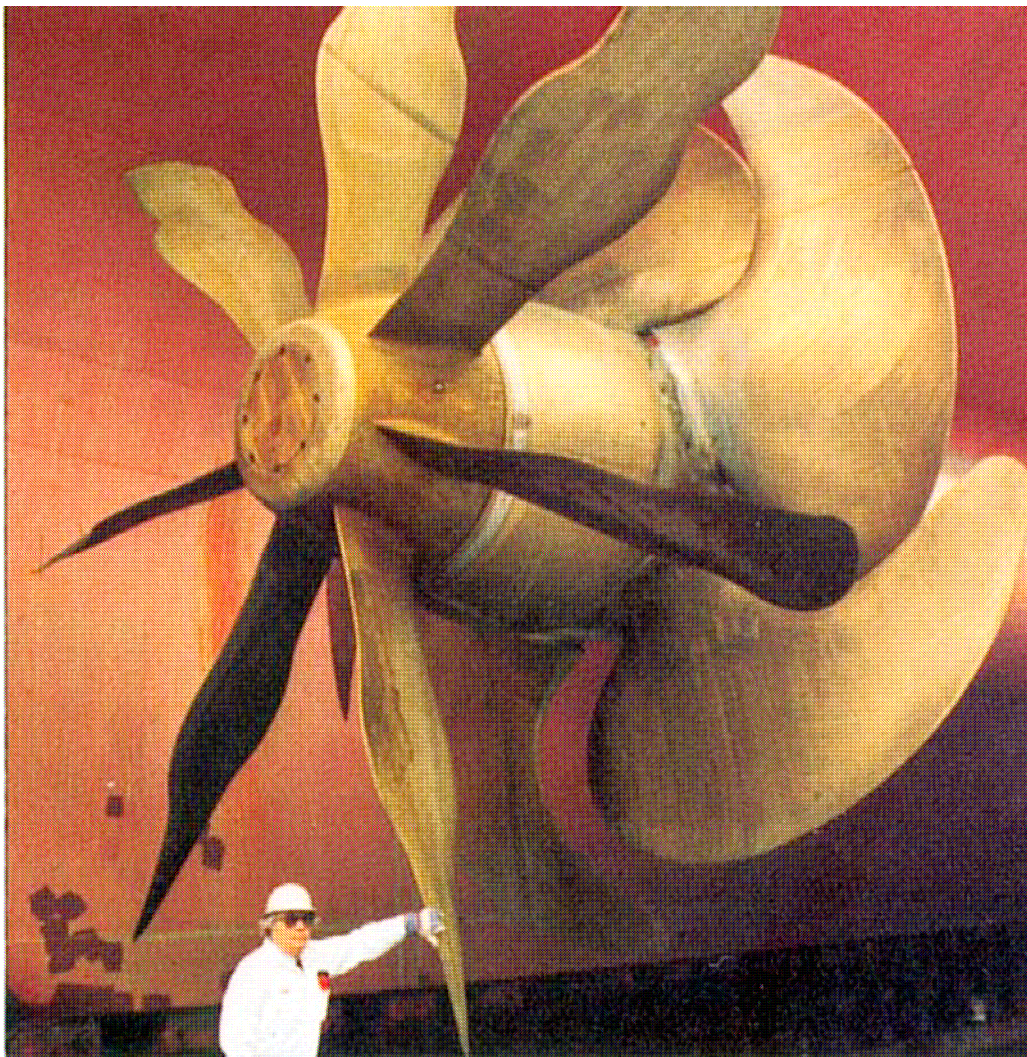
Sa napuštanjem tradicionalnih zaobljenih profila kape novije izvedbe se fokusiraju više na jednostavnost proizvodnje i montaže kape. Tehnologija proizvodnje takvih modernih kapa je bitno jednostavnija, a same kape zbog manje dužine mogu biti bitno lakše. Zbog toga cijena takve kape je također niža.

### **Grimovo kolo**

Grimovo kolo je drastično izmijenjen dizajn kape brodskog vijka koji ima za cilj iskoristiti tangencijalne komponente strujanja mlaza brodskog vijka. Za razliku od normalne izvedbe kape grimovo kolo nije fiksirano za vratilo i glavinu brodskog vijka, već je slobodno rotirajuće. Na toj slobodnorotirajućoj kapi postavljen je veći broj krila/lopatica kao je to vidljivo na slici 18. Promjer samog grimovog kola je veći od promjera vijka, te ima i veći broj krila/lopatica nego sam vijak. Unutarnji dio grimovog kola funkcionira kao turbina koja koristi kinetičku energiju tangencijalnih brzina strujanja iza vijka za pogon rotacije kola. S druge strane vanjski dio krila grimovog kola funkcioniraju kao krila brodskog vijka te tako pretvaraju pretvaraju tangencijalnu kinetičku energiju u dodatni potisak broda u pogonu.

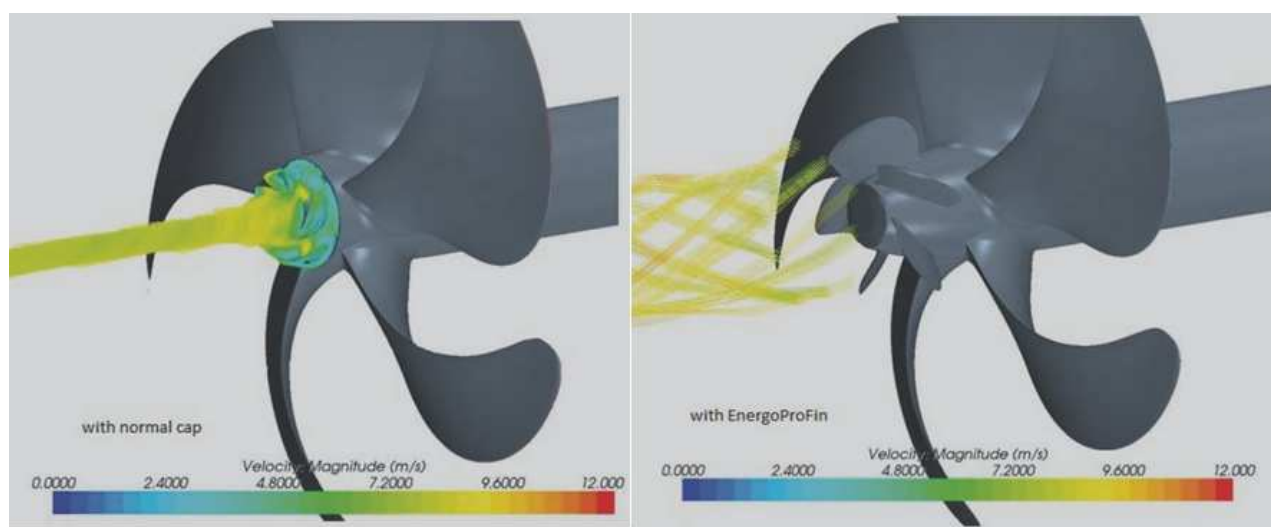
Ukupno povećanje učinka propulzije grimovog kola može doseći do 10%, no u praksi je bitno manja. Unatoč toj potencijalno uštedi goriva grimovo kolo nije postalo popularno zbog kompliciranog dizajna, cijene proizvodnje i ugradnje, te težeg održavanja.





Slika 18. Grimovo kolo. (Sambolek: Propulzija broda)

### Kape sa krilcima za slabljenje vrtloženja (Propeller Boss Cap Fins)



Slika 19. 3D prikaz korištenja krilaca na kapi za slabljenje vrtloženja. (maritimepropulsion.com)





Slika 20. i 21. Smanjenje centralnog kvitacijskog vrtloga na kapi sa krilcima (lijevo) u usporedbi sa veličinom centralnog vrtloga kod klasične zaobljene kape (desno). (<http://www.mol.co.jp/en/pr/2011/1145.html>)

U novije vrijeme se na inače standardnu modernu izvedbu kape dodaju krilca za smanjenje centralnog vrtloga mlaza. Samim smanjenjem vrtloženja umanjuje se i stvaranje podtlaka na kapi vijka, te pojava kvitacije. Rezultat je bitno poboljšanje učinka propulzije, i do 5% prema navodima proizvođača takvih kapa.



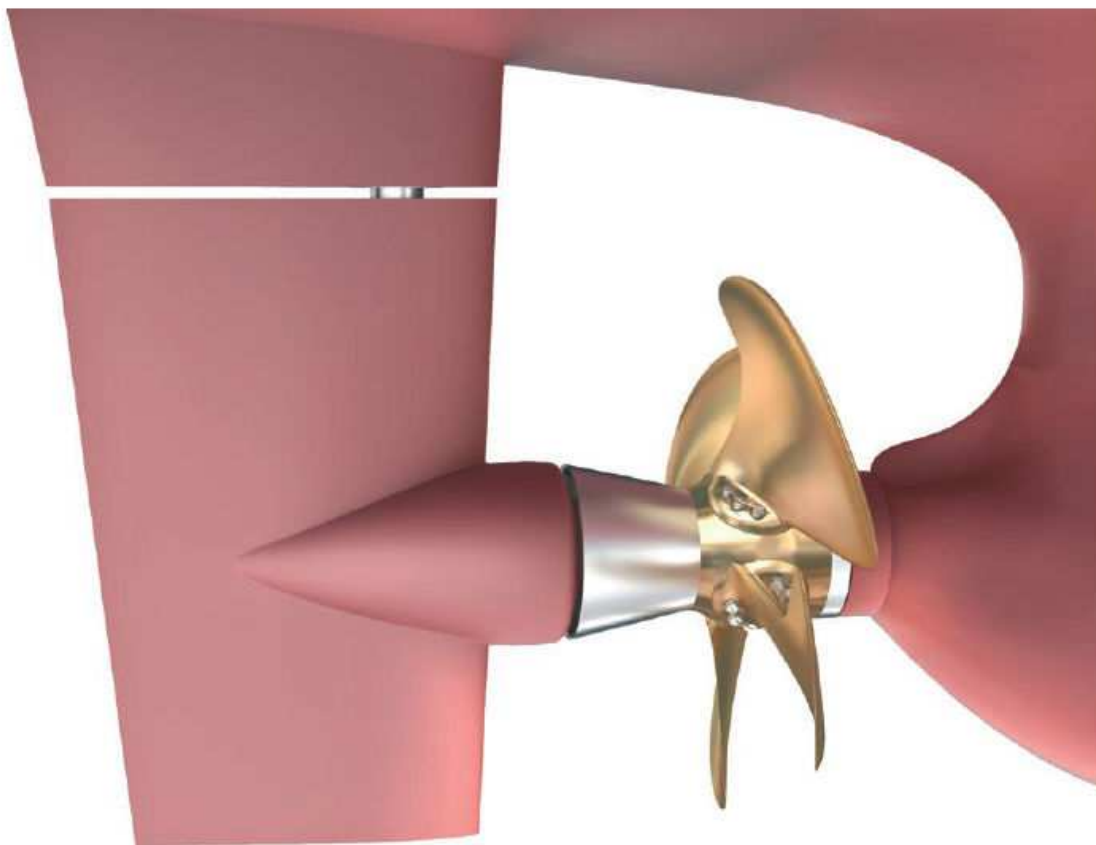
Slika 22. Kapa sa krilcima za smanjenje vrtloženja. (<http://gcaptain.com/propeller-technology-ship-efficient/>)

Prednost koju takva kape imaju nad grimovim kolom je bitno jednostavnija izvedba, manja masa, lakše održavanje i niža cijena.

### **Integrirani sustav brodskog vijka i kormila**

U toj izvedbi kape ona stvara direktni spoj brodskog vijka i kormila broda. Sužavanje promjera kape brodskog vijka počinje tek nakon spoja kape sa kormilom. Očito je da se takvom izvedbom izbjegava nastajanje kvitacijskog vrtloga preko površine kormila, te time i potencijalno oštećenje kormila kolapsom kvitacijskih mjehurića. Isto tako budući da prije smanjenja promjera kape vrtložni mlaz prelazi preko vertikalne ravne površine kormila tangencijalne komponente brzine će se prigušiti na kormilu. Na taj način vrtlog koji će nastati

iza kormila je znatno manji nego kod normalne izvedbe, te će tako smanjiti i pottlak uslijed djelovanja centrifugalnih sila, odnosno povećati učinak propulzije.



Slika 23. Integrirani sustav brodskog vijka i kormila proizvođača Rolls-Royce Promas.

### 2.3. Materijal za izradu kapa brodskih vijaka

Kapa brodskog vijka je u većini slučajeva izrađena iz istog materijala kao i brodski vijak jer su oboje opterećeni sličnim kavitacijskim i dinamičkim opterećenjima. Uz to budući da su u tipičnoj izvedbi kapa brodskog vijka i glavina vijka u međusobnom u direktnom kontaktu poželjno je da su izrađeni iz istog materijala kako bi se smanjila opasnost od galvanske korozije između njih.

U novije vrijeme najčešće korišteni materijal za izradu vijaka i kapa je aluminisko-nikalna bronca, na primjer  $\text{CuAl10Fe5Ni5}$ . To je ponajprije zbog osobite otpornosti tog materijala na kavitacijsku eroziju i opću koroziju, te dobre dinamičke čvrstoće kad je uronjen u morsku vodu ( $\sim 120 \text{ MPa}$  za aluminisko-nikalne bronce u usporedbi sa  $\sim 100 \text{ MPa}$  za nehrđajuće austenitne čelike)

Uz to aluminisko-nikalne bronce imaju cijeli niz drugih prednosti, kao što je manja gustoća od čelika ( $7,6 \text{ t/m}^3$ ), manja sklonost krtosti pri niskim temperaturama, te niska razlika potencijala kad su u sklopu sa austenitnim nehrđajućim čelicima (20 do 25 mV) što olakšava zaštitu od galvanske korozije u sklopovima koji kombiniraju ta dva materijala.

### **3. Tehnološka razrada lijevanja kape brodskog vijka**

Kao primjer koristi će se kapa brodskog vijka lijevanog za brodogradilište 3-Maj u ljevaonici Strojarski d.o.o. Ta kapa je sa tehnološkoga stanovišta izrazito dobro riješena, bez nepotrebnih velikih promjena u debljini presjeka, i bez kompliciranih korugiranih zidova koji se često sreću u drugim rješenjima kapa brodskih vijaka.

U ovom slučaju finalna obrada kape biće obavljena u brodogradilištu, a ljevaonica će isporučiti grubo obrađeni odljevak, s tim da će se gruba strojna obrada obaviti samo u kritičnom dijelu flanže kape radi detekcije potencijalnih grešaka pri lijevanju. Isporučena grubo obrađena kapa imati će 5 mm dodatka na dimenzije flanže, ostatak odljevka će se isporučiti sirov odliven na konačne dimenzije.

Na temelju tih podataka može se napraviti nacrt grubo obrađenog odljevka spremnog za isporuku (Slika 24).

#### **3.1. Tehnološka razrada crteža odljevka**

Ova faza se sastoji od ucrtavanja polaznih elementa tehnologije lijevanja i tehnologije izrade modela na nacrtu grubo obrađenog odljeva.

Prvo ocrtavamo dodatke na za grubu obradu na flanže odljeva. Za lijevanje pojedinačnih jednostavnih odljevaka maksimalnih dimenzija 800 do 1200 mm preporuča se dodatak od 6 mm po stijeni. Budući da u našem slučaju već imamo 2,5 mm dodatka na konačne dimenzije za finalnu obradu možemo za grubu obradu uzeti nešto manje dodatka. Zbog toga na flanže kape označimo dodatak od samo 5 mm, te na njega dodajemo još zakošenje od 2 mm po stranici na daljnjem dijelu boka flanže. To zakošenje je potrebno kao bi se olakšalo vađenje modela iz kalupa bez oštećenja pješćanih zidova klupa. Na sam plašt kape vijka nije potrebno dodavati nikakve dodatke jer se on ne obrađuje, i već ima potrebna ljevačka zakošenja.

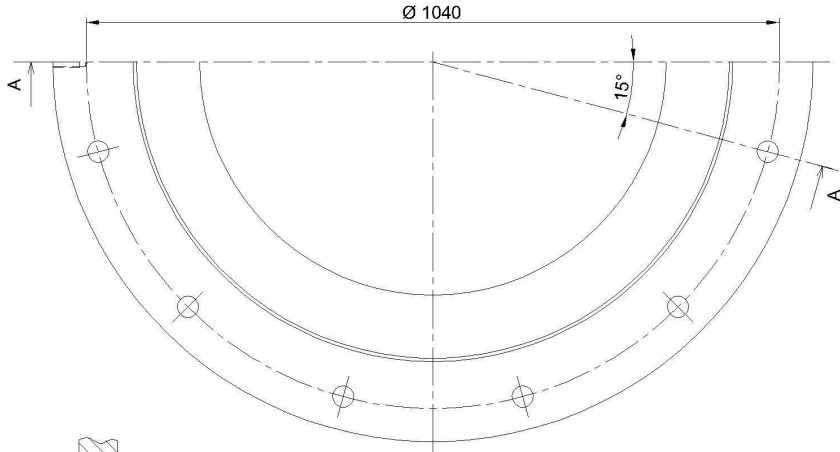
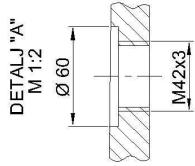
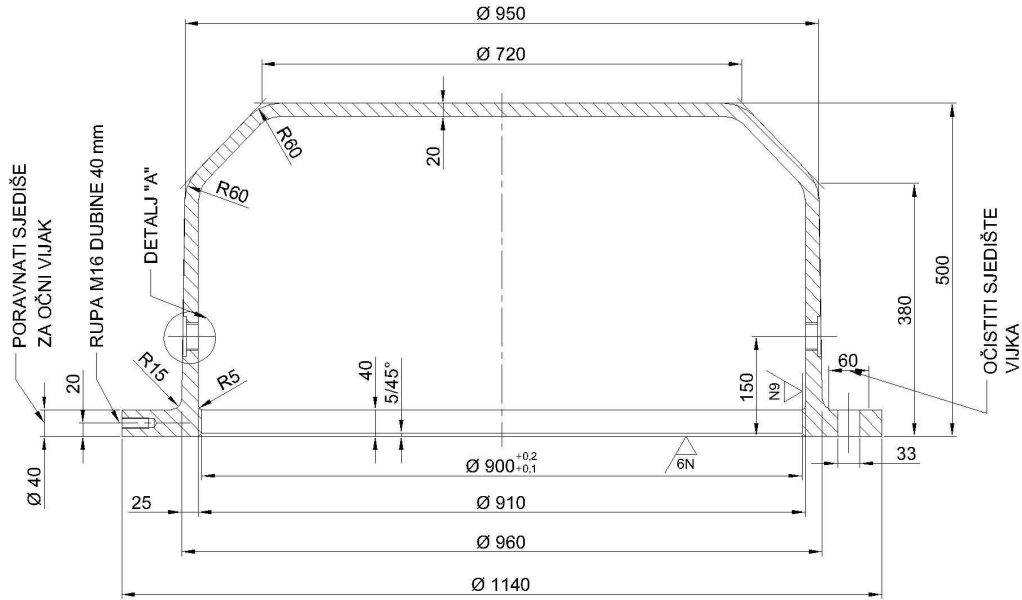
Sljedeći korak je ucrtavanje jezgre. Jezgra će ispuniti cjelokupnu unutrašnjost odljeva. Jedini dio jezgre koji će biti izvan odljeva je jezgrena oslonac (marka). Dužina jezgrenog oslonca je ograničena položajem armature u donjoj kalupnici. Na temelju toga određujemo visinu oslonca jezgre jezgre na 70 mm. Oslonac jezgre može imati i zakošenje za lakše umetanje u kalup, u našem slučaju odabiremo kosinu od 10°. Te dimenzije oslonca jezgre ucrtavamo u nacrt i samu jezgru označavamo mrežastom šafurom.

Na osloncu jezgre treba dodati određenu zračnost između kalupa i jezgre. Preporučena zračnost za oslonac jezgre naših dimenzija je 2 mm, no zbog potrebe boljeg centriranja jezgre uzimamo manju zračnost od 1 mm.

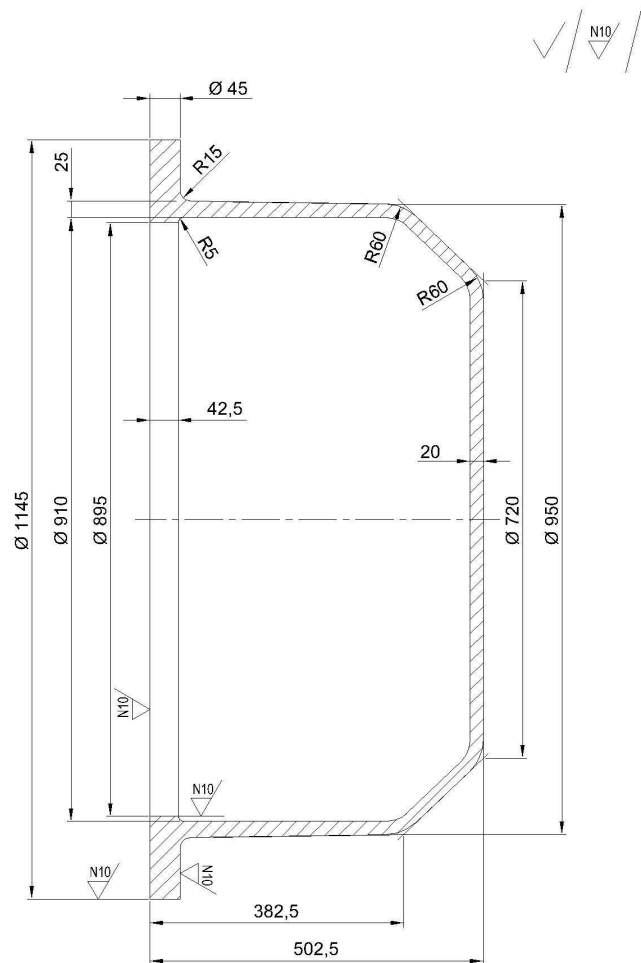
#### **3.2. Model i jezgrenik**


Kako bi se mogao izraditi model i jezgrenik potrebo je definirati njihove dimenzije. Najjednostavniji način da se to obavi je dati modelaru kotirani tehnološki razrađen nacrt odljevaka sa ucrtanom jezgrom i dodacima. Budući da taj nacrt nema dodatke za stezanje nužno je u nacrt navesti veličinu stezanja, u našem slučaju 2%. Alternativa je da se modelaru dostavi nacrt ili skica modela i jezgrenika kojima su bitne dimenzije već kotirane u njihovim stvarnim dimenzijama, bez potrebe da modelar sam dodaje korekcije za stezanje odljevka.

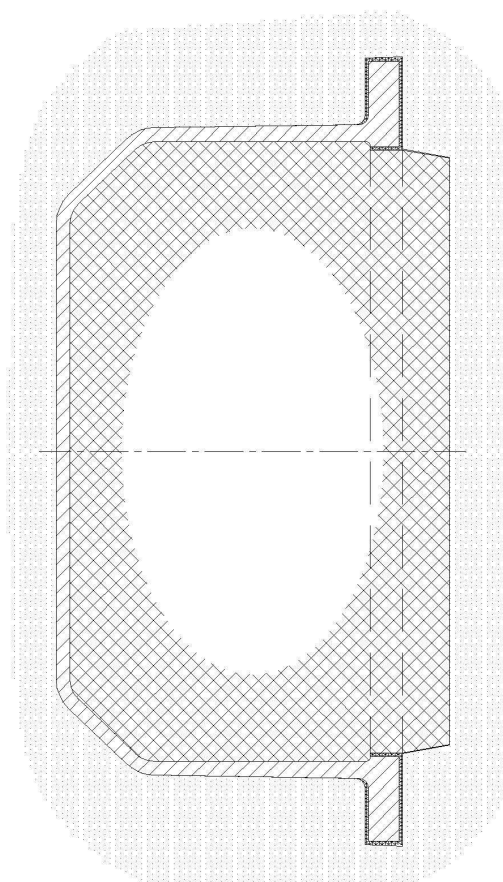
# PRESJEK A-A



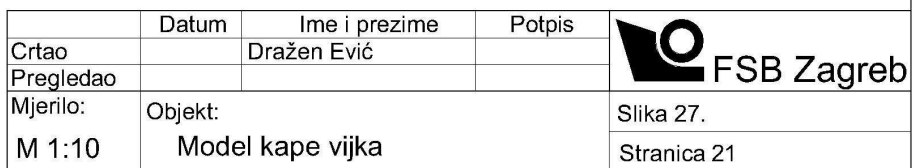
Crtao	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb
Pregledao		Dražen Ević		
Mjerilo:	Objekt:			Slika 24.
M 1:10	Kapa broskog vijka			Stranica 18



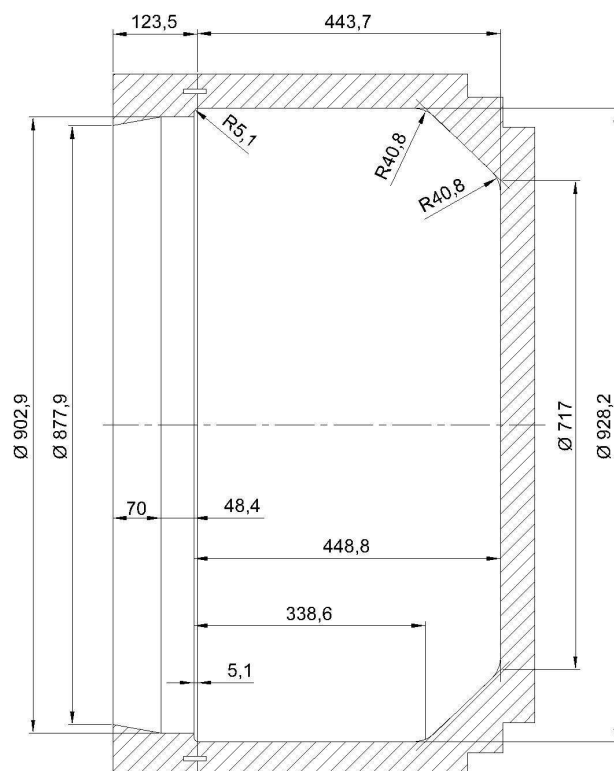
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Crtao		Dražen Ević		
Pregledao				
Mjerilo:	Objekt:			Slika 25.
M 1:10	Grubo obrađena kapa vijka			Stranica 19




	Datum	Ime i prezime	Potpis
Crtao		Dražen Ević	
Pregledao			
Mjerilo:	Objekt:		Slika 26.
M 1:10	Razrada nacrtu kape vijka		Stranica 20







	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Crtao		Dražen Ević		
Pregledao				
Mjerilo:	Objekt:			Slika 28.
M 1:10	Jezgrenik kape vijka			Stranica 22

### 3.3. Projektiranje ljevačkog kalupa

#### 3.3.1. Masa i volumen odljeva

Za daljnje projektiranje kalupa potrebna je informacija o volumenu i masi odljeva. Volumen određujemo modeliranjem odljeva kao 3D objekta u nekom CAD programu.

$$\rho = 7,6 \text{ kg/L} \quad - \text{ gustoća CuAl10Fe5Ni5 brončane legure}$$

masa grubo obrađenog odljeva:

$$V_{go} = 56 \text{ L}$$

$$m_{go} = V_{go} \cdot \rho = 426 \text{ kg}$$

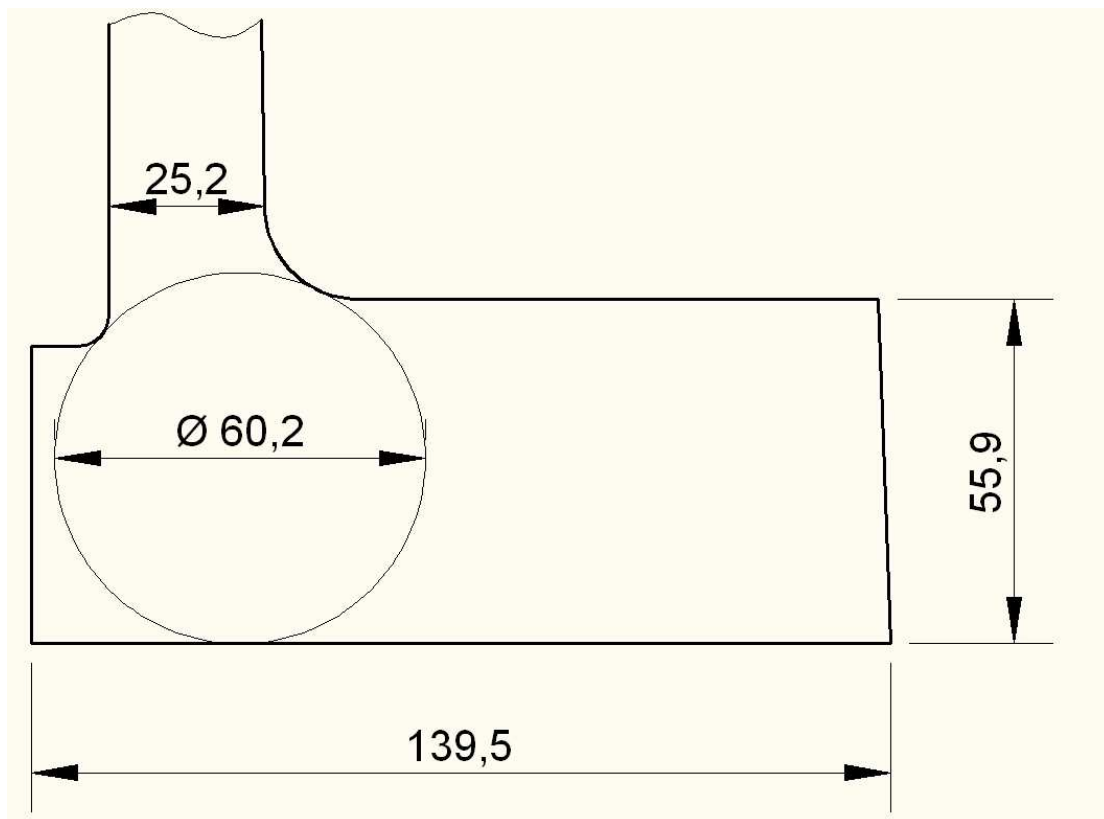
masa očišćenog odljeva:

$$V_o = 63 \text{ L}$$

$$m_o = V_o \cdot \rho = 479 \text{ kg}$$

#### 3.3.2. Napajanje odljeva

Pravilno napajanje je ključno za uspješno lijevanje odljeva. Za projektiranje napajanja potrebno je procijeniti vjerojatni redoslijed skrućivanja. U pravilu, ako se ne koriste vanjska ili unutarnja hladila, odljevak će se skrućivati od dijela sa manjom modulom do dijela sa većim modulom. Usahline će se pojavljivati na mjestu koje se zadnje skrućuje, odnosno na mjestu najvećeg modula. U našem slučaju najveći modul će biti u spoju flanše i plašta.



Slika 29. Prirubnica kape sa ucrtanim dimenzijama potrebnim za proračun modula.

Modul flanže izračunavamo prema sljedećoj formuli:

$$M = \frac{a \cdot b}{(a + b) - c}$$

gdje je:

$$a = 60,2 \text{ mm}$$

$$b = 139,5 \text{ mm}$$

$$c = 25,2 \text{ mm}$$

Stoga sljedi:

$$M = 22,5 \text{ mm}$$

Uz modul flanže treba izračunati i modul gornjeg dijela plašta kape jer će njega biti teško napajati iz pojila spojenih na flanže odljeva. Taj modul dobivamo prema sljedećoj formuli:

$$M = \frac{d}{2}$$

gdje je:

$$d = 20 \text{ mm} \quad \text{-debljina stijene gornjeg dijela kape}$$

$$M = 10 \text{ mm}$$

Modul pojila treba biti barem 20% veće od najvećeg modula dijela odljeva kojeg će specifično pojilo napajati. Stoga:

- za flanžu kape:

$$M > 27 \text{ mm}$$

- za gornji plašt kape

$$M > 12 \text{ mm}$$

Ukupan volumen pojila potreban za sigurno napajanje:

$$V_{poj} > k \cdot V$$

$$k = 0,35 \quad \text{- koeficijent za aluminijske bronce}$$

Taj volumen je podijeljen između pojila koja će napajati flanžu kape, i volumena koji će napajati gornji plašt kape.

Aproksimacija volumena gornjeg dijela plašta:

$$V_c = 17 \text{ L}$$

Aproksimacija volumena flanže:

$$V_f = 46 \text{ L}$$

Centralno pojilo koje napaja gornji plašt kape:

$$V_{c.poj} > k \cdot V_p$$

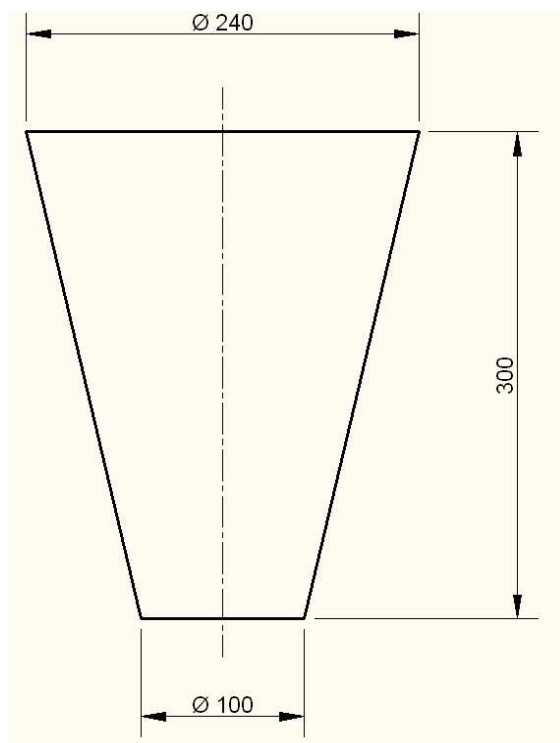
$$V_{c.poj} > 6 \text{ L}$$

Šest pojila koja napajaju flanžu:

$$V_{f.poj} > k \cdot V_p$$

$$V_{f.poj} > 16,1 \text{ L}$$

Na temelju tih podataka odabiremo među modelima pojila koje posjeduje ljevaonica one koji zadovoljavaju gore navedene uvijete. Za napajanje gornjeg plašta kape odabiremo stožasti model prikazan u slici 30.



Slika 30. Centralno pojilo.

Taj model ima sljedeća svojstva:

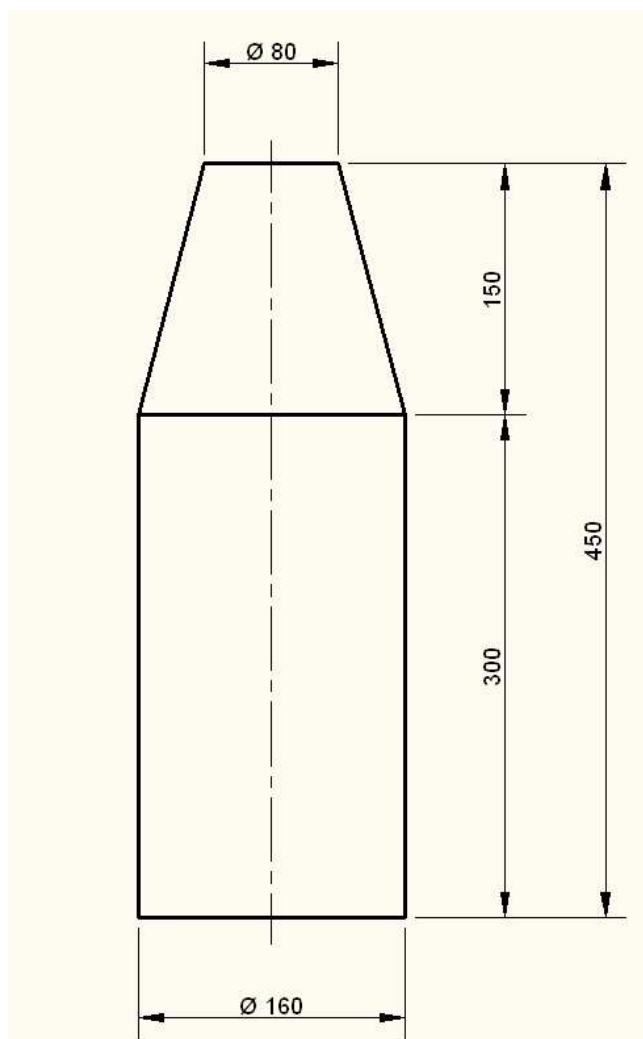
$$V_{c.poj} = 7,2 \text{ L} > 6 \text{ L}$$

$$M = 25 \text{ mm} > 10 \text{ mm}$$

$$m_{c.poj} = 58 \text{ kg} \quad - \text{ masa centralnog pojila}$$

Za napajanje flanže koristiti ćemo šest pojila simetrično raspoređenih oko odljeva. Ta pojila moraju napajati bočni plašt kape do visine od oko 400 mm što diktira minimalnu visinu bočnih pojila od preko 400 mm kako bi hidrostatski tlak stupca taline u pojilu mogao

nahriniti potrebnu visinu odljeva. Za ta pojila odabiremo kombinaciju modela koji daju oblik pojila koji možemo aproksimirati slikom 31.



Slika 31. Bočna pojila.

Bočna pojila imaju sljedeća svojstva

$$V_{poj} = 7,9 \text{ L} \quad - \text{volumen pojedinačnog bočnog pojila}$$

$$V_{f.poj} = 6 \cdot 7,9 = 47,4 \text{ L} > 16,1 \text{ L}$$

$$M = 30 \text{ mm} > 27 \text{ mm}$$

$$m_{f.poj} = 360 \text{ kg} - \text{ukupna masa bočnih pojila}$$

Za razliku od centralnog pojila, koje je direktno postavljeno na odljevak, bočna pojila moraju biti spojena sa odljevom pomoću vrata, koji mora zadovoljavati minimalnu veličinu modula kao bi omogućio neometano napajanje kroz cijelo proces skrućivanja. Modul vrata mora biti 10 % veći od najvećeg modula kojeg će napajati.

$$M = 22,5 \cdot 1,1 = 25 \text{ mm}$$

Iz odgovarajućih dijagrama se mogu očitati dimenzije pravokutnih presjeka koji zadovoljavaju taj modul. Odabrane su sljedeće dimenzije:

$$s = 160 \text{ mm}$$

$$h = 70 \text{ mm}$$

Budući da su bočna pojila zatvorenog tipa na vrhu svakoga čće se postaviti po jedan odušak promjer  $\sim 8 \text{ mm}$  kako bi se osigurao neometano izbacivanje zraka i plinova u toku lijevanja.

### 3.3.3 Projektiranje uljevnog sistema

Uljevni sistem kalupa se sastoji od čaše, spusta, razvodnika i ušća. U našem slučaju radi smanjenja vremena ulijevanja koristiti ćemo dvostruki uljevni sustav, sa dvije čaše i dva spusta na suprotnim stranama kalupa. Uz to izostavit ćemo razvodni sustav već ćemo spust spojiti sa modelom direktno sa ušćima na flanži odljeva.

Ušće ćemo postaviti tako da talina doteče u kalupnu šupljinu tangencijalno na obod flanže. Tako izbjegavamo udaranje taline direktno u jezgru i smanjujemo vjerojatnost oštećenja pješćanih zidova kalupe šupljine mlazom taline.

Budući da se ove kape brodskih vijaka lijevaju u pojedinačnoj proizvodnji neće se izrađivati modeli uljevnog sistema, već će se dijelovi uljevnog sustava improvizirati iz postojeće lepeze modela u ljevaonici, te kasnije ručno dorađivati. Zbog toga dimenzije u ovom proračuni su više orijentacijske za kalupere, te ne sadržavaju detalje kao što su ljevačka zakošena i sl.

Za projektiranje uljevnog sistema moramo imati aproksimaciju vremena ulijevanja. Za to ćemo koristiti Dietert-ovu formulu:

$$t = s \cdot \sqrt{m} \text{ [s]}$$

gdje je

$m$  - ukupna masa taline u kalupu

$s$  - koeficijent ovisan o debljini stijene i masi odljeva

Masa odljeva je masa očišćenog odljeva, plus mase pojila i masa u samom uljevnom sustavu.

$$m = m_o + m_{c.poj} + m_{f.poj} + m_{us}$$

$$m \sim 900 \text{ kg}$$

Koeficijent  $s$  određujemo iz dijagrama pomoću mase odljeva (479 kg) i srednje debljine stijenke ( $\sim 30 \text{ mm}$ )

$$s = 1$$

vrijeme ulijevanja je:

$$t \sim 30 \text{ s}$$

Zatim trebamo odrediti najmanju površinu presjeka prema formuli:

$$A_{\min} = \frac{m}{\mu \cdot t \cdot \rho \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_R}}$$

$$H_R = H - \frac{C}{2} \quad - \text{ srednja visina ulijevanja}$$

gdje je:

$$m \sim 900 \text{ kg} \quad - \text{ ukupna masa taline u kalupu}$$

$$\mu = 0,4 \quad - \text{ koeficijent brzine istjecanja za lijevanje odozdo u ručno kalupljene kalupe}$$

$$t = 30 \text{ s} \quad - \text{ vrijeme ulijevanja}$$

$$\rho = 7500 \text{ kg/m}^3 \quad - \text{ gustoća taline}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad - \text{ akceleracija slobodnog pada}$$

$$C = 0,8 \text{ m} \quad - \text{ visina odljeva}$$

$$H = 0,8 \text{ m} \quad - \text{ maksimalna visina ulijevanja}$$

Stoga slijedi:

$$H_R = 0,4 \text{ m}$$

$$A_{\min} = 0,0036 \text{ m}^2 = 3600 \text{ mm}^2$$

Ako to podijelimo na dva spusta dobivao sljedeći minimalni promjer uljevnog sustava:

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot A_{\min}}{\pi}}$$

$$d = 47,9 \text{ mm}$$

Na temelju toka odabiremo promjer spusta od 50 mm.

### Ušće

Za izvedbu ušća uzet ćemo sistem bez prigušena jer on daje manju brzinu ustrujavanja taline u kalup te manje vrtloženje. To smanjuje vjerojatnost odštećivanja kalupa strujom taline, te smanjuje broj uključaka aluminiskog oksida unutar taline.

Za uljevni sistem bez prigušena uzimamo presjek ušća veći od presjeka spusta. Stoga ušće ima sljedeće dimenzije:

$$s = 50 \text{ mm}$$

$$h = 56 \text{ mm}$$

Radi smanjena uključaka šljake u odljevu poželjno je unutar ušća postaviti filter. Za postavljanje filtra potrebo je u uljevnom sustavu, na prolazu ušća, predvidjeti prostor dimenzija 140x140x32 mm u koji se postavlja SEDEX 135x135x30/10 ppi filter.

### Uljevna čaša

Za uljevu čašu koristiti će se standardni model prisutan u ljevaonici. Ona mora zadovoljiti zahtjev minimalnoga volumena koji je funkcija mase odljeva, odnosno u našem slučaju pola mase odljeva jer ulijevamo na dvije čaše.

$$V_{\epsilon} = k \cdot \frac{m}{t \cdot \rho}$$

gdje je:

$k = 4$  - koeficijent za odljeve od 100 do 500 kg

$m \sim 450$  kg - ukupna masa taline u kalupu

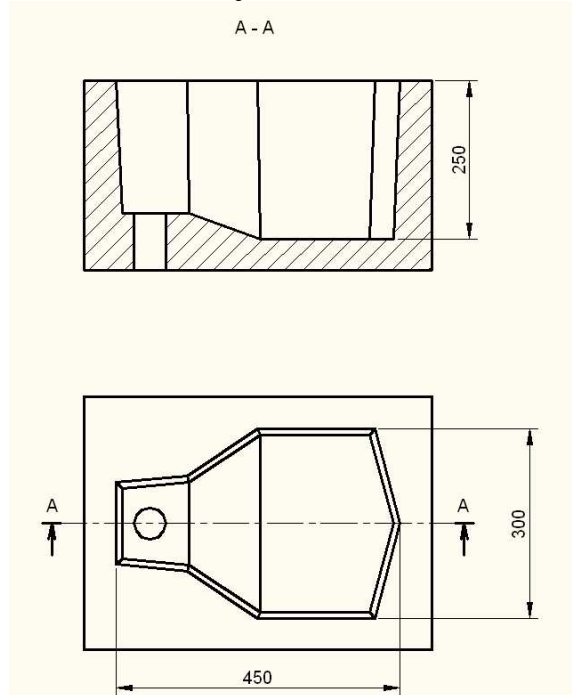
$t = 30$  s - vrijeme ulijevanja

$\rho = 7,5$  kg/L - gustoća taline

Slijedi:

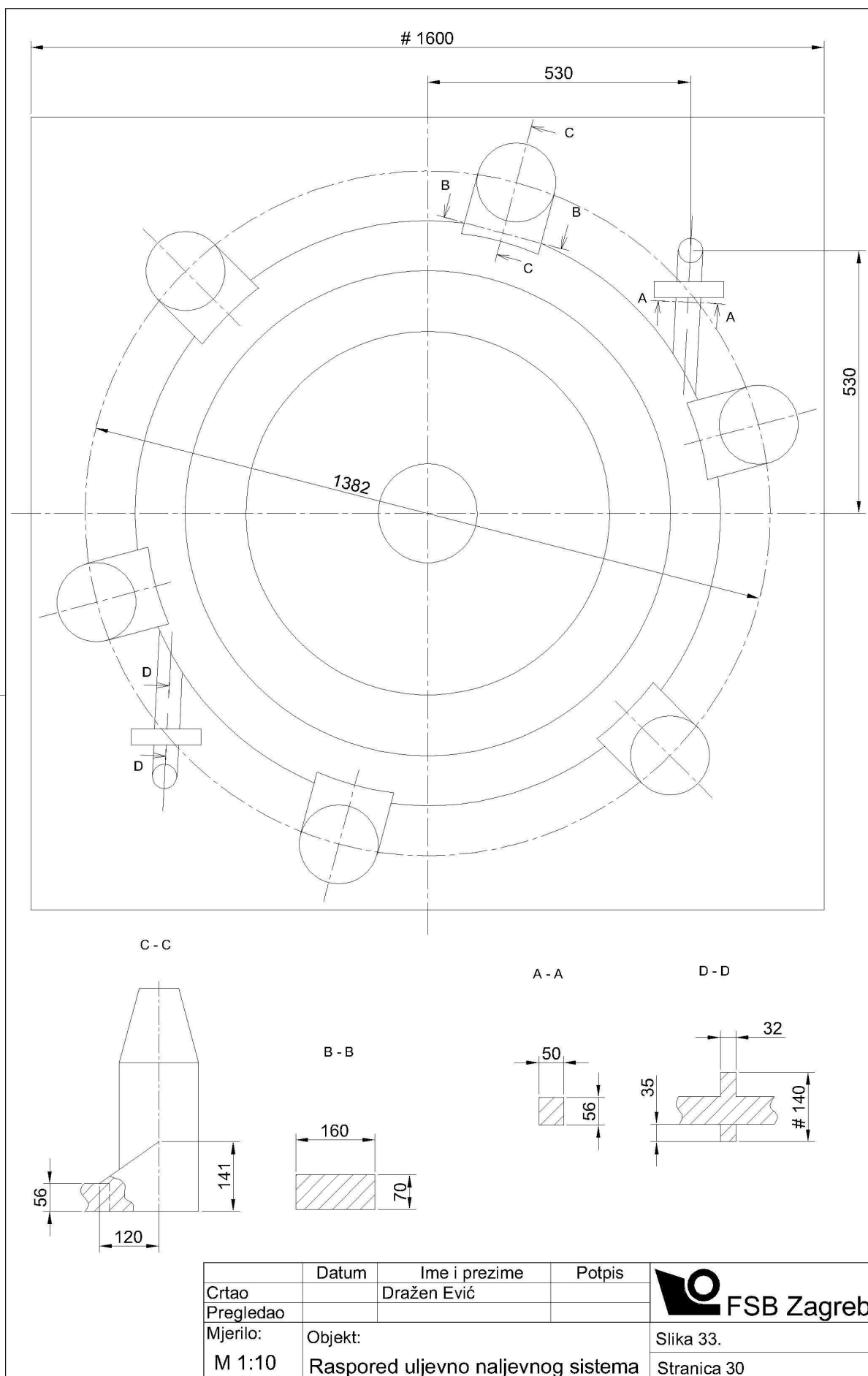
$$V_{\check{c}} = 8 \text{ L}$$

Naša uljevna čaša ima oko 22 L te zadovoljava minimalni traženi volumen.



Slika 32. Skica uljevne čaše.





### 3.3.4. Odabir kalupnica

Zbog pojedinačne proizvodnje za lijevanje se neće projektirati i izraditi nove kalupnice već će se koristiti postojeće. Prvi korak u odabiru kalupnica je određivanje dimenzija potrebnih za smještaj modela i uljevno nalivnog sustava. To se radi crtanjem rasporeda modela, dijelova uljenog sistema sistema te pojila kako što se može vidjeti na slici 33. Na temelju tog nacрта odabiremo kalupnice dimenzija 1600 x 1600 mm.

Za određivanje visine kalupnica moramo utvrditi ukupni visinu odljeva. Naš odljevak je visok nešto preko 500 mm. Pješčani svod i pod na gornjoj kalupnici ne bi smio biti manji od 100 mm, a na dnu kalupnice nam je potrebno barem 150 mm za ležište jezgre. To daje minimalnu visinu kalupnica od 750 mm.

Mi odabiremo sljedeće kalupnice:

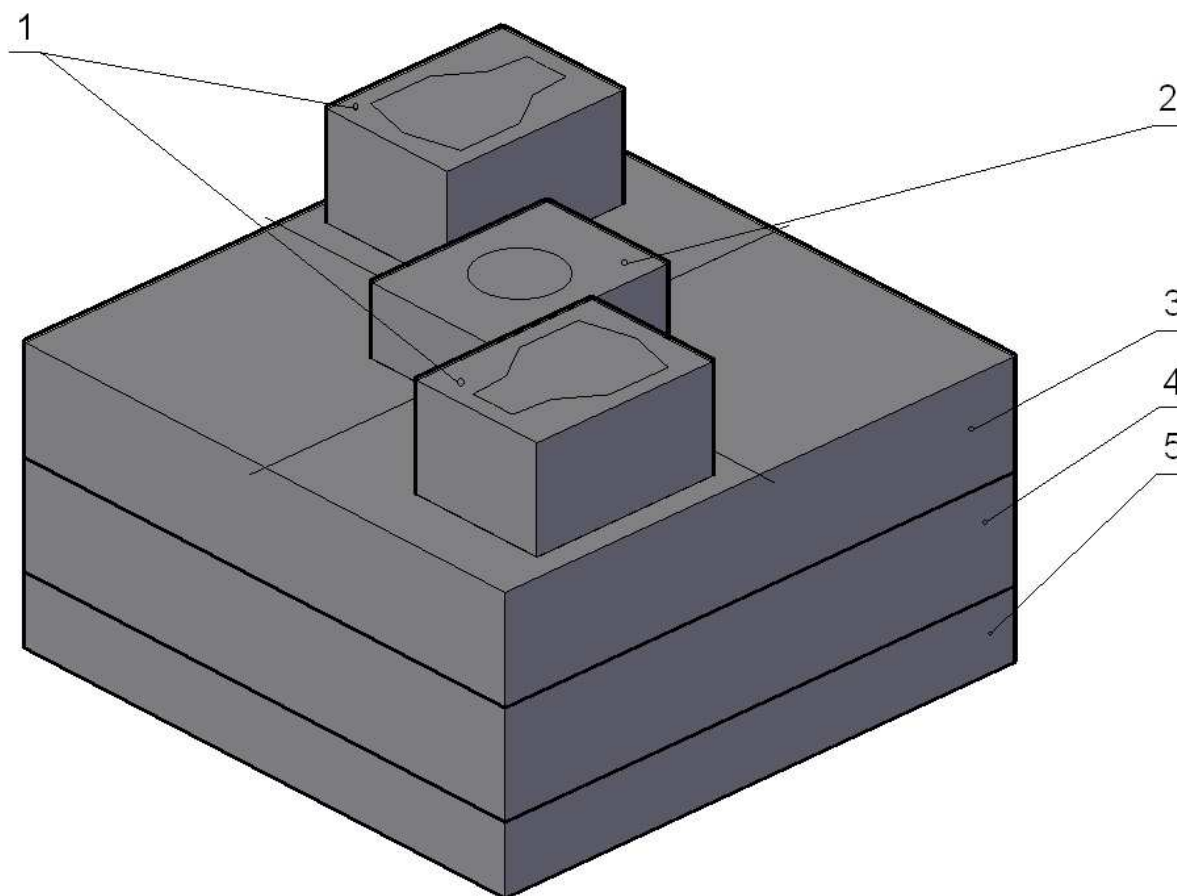
1600 x 1600 x 200    1 komad    - donja kalupnica

1600 x 1600 x 300    2 komada    - srednja i gornja kalupnica

Na to osnovno tijelo kalupa moramo još dodati produžetke za centralno pojilo te uljevne čaše.

550 x 400 x 300    2 komada    - standardne dimenzije kalupnica za uljevne čaše

550 x 400 x 20    1 komad    - kalupnica za centralno otvoreno pojilo



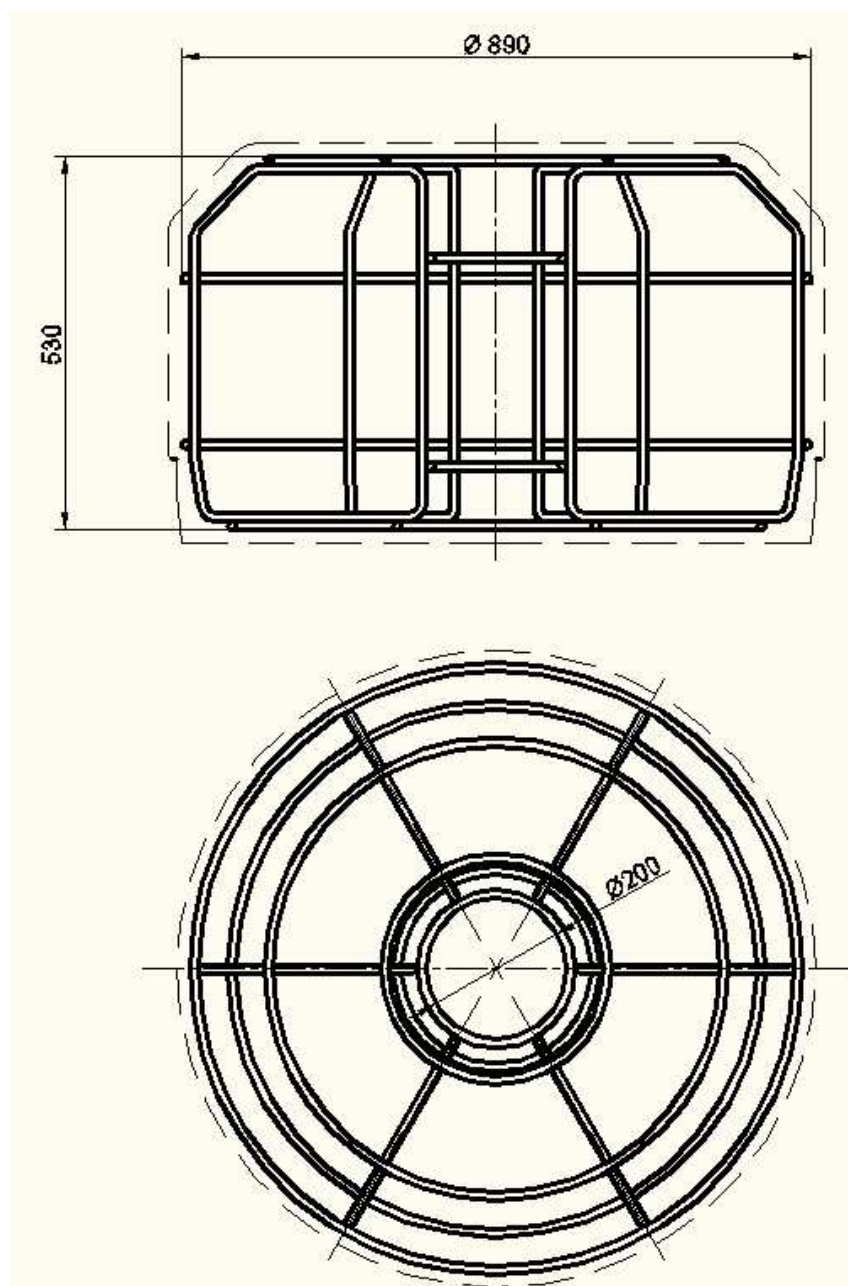
Slika 34 Sklopljeni kalup kape: 1- uljevne čaše, 2- centralno pojilo, 3- gornja kalupnica, 4- srednja kalupnica, 5- donja kalupnica.

### 3.3.5. Armatura jezgre i kalupa

Kako bi se smanjila mogućnost pucanja kalupnog pijeska, poboljšala sposobnost kalupa da izdrži manipulaciju u toku kalupljenja, te izdrži statičke pritiske taline nakon ulijevanja, pijesak mora biti pojačan armaturom. Ona se obično sastoji od mreže tanjih profila i šipki.

Za armaturu kalupa koristiti će se već ugrađena armatura u postojeće kalupe. Oblik same armature će se dorađivali u toku samog kalupljenja doradom postojeće armature autogenim rezanjem viškova i zavarivanjem dodatnih pojačanja gdje je to potrebno.

Armatura jezgre mora se pripremiti prije kalupljenja zavarivanjem čipki od  $\Phi 8$  do  $\Phi 12$  mm debljine u odgovarajuću mrežu prema slici 35. Sami detalji armature nisu bitni dok god su gabaritne dimenzije približno zadovoljne.



Slika 35 Armatura jezgre.

### 3.3.6. Fiksiranje jezgre i kalupnica

Budući da je gustoća taline aluminijske bronce do 3 puta veća od prosječne gustoće materijala kalupa i jezgre na njih će djelovati jaka sila uzgona. Da se spriječi otvaranje kalupa i plutanje jezgre djelovanjem tog hidrostatskog uzgona nužno je fiksirati jezgru za armaturu kalupa, te opteretiti kalup sa dovoljnom količinom utega.

Masu utega za otežavanje kalupa možemo odrediti prema sljedećoj formuli:

$$m \geq \frac{A \cdot H \cdot \Delta\rho}{g}$$

gdje je:

$\Delta\rho = 5000 \text{ kg/m}^3$  - razlika gustoće taline i gustoće materijala kalupa

$H = 0,8 \text{ m}$  - najveća visina stupca taline u kalupu

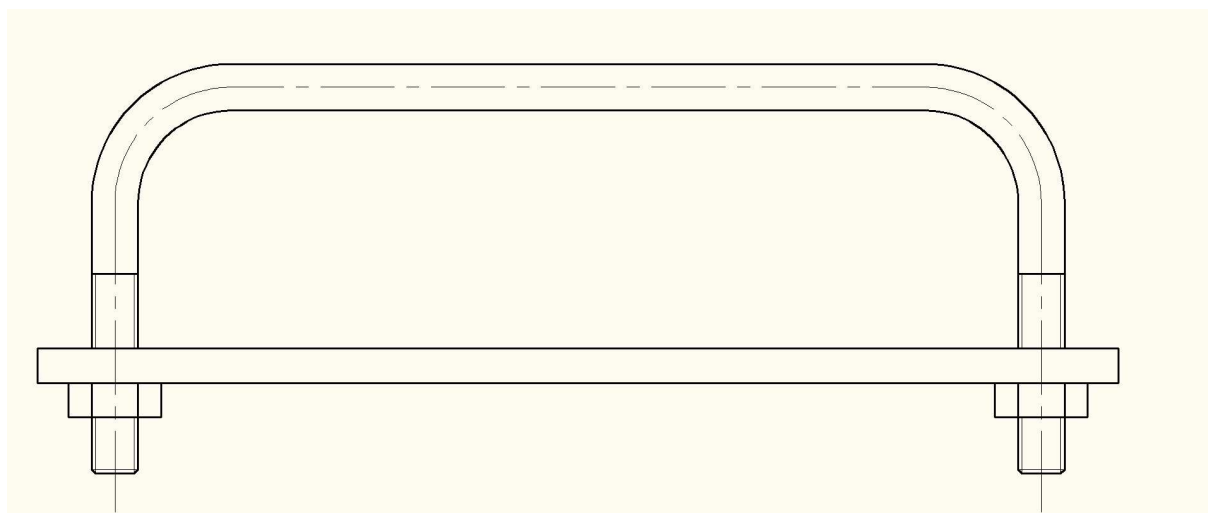
$A \sim 1,4 \text{ m}^2$  - površina horizontalnog presjeka kalupne šupljine i dodatna površina podljevanja taline između kalupnica

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  - akceleracija slobodnog pada

Sjedi:

$$m > 560 \text{ kg}$$

Fiksiranje armature je bitno teže jer se ona ne može jednostavno opteretiti utezima. Umjesto toga nju ćemo fiksirati povezujući armaturu jezgre i armaturu donje kalupnice pomoću šipke U oblika koja se može vidjeti na skici 36.



Slika 36. Skica U šipke sa dvostranim navojem koja povezuje armaturu jezgre i armaturu dolje kalupnice.

### 3.4. Materijal za lijevanje

Da odredimo ukupnu masu materijala potrebo za lijevanje kape broskog vijka moramo odrediti ukupni volumen svih dijelova kalupne šupljine koji će biti ispunjeni talinom. ta bilanca se vidi u tablici 1. U tablici pretpostavljamo da će uljevne čaše biti ispunjene samo do polovice svog volumena.

DIO	KOMADA	VOLUMEN [L]	MASA [kg]
MODEL	1	63	480
BOČNA POJILA	6	8	360
VRATA BOČNIH POJILA	6	0,2	10
CENTRALNO POJILO	1	7,2	60
ČAŠA	2	11	170
SPUST	2	1,6	25
UŠĆE	2	0,8	15
Σ		146,2	1120

Tablica 1 Bilanca mase taline ulivene u kalup.

Na tu masu treba još dodatni izgor koji za aluminijske bronce iznosi ~ 8%, što daje ukupnu masu materijala koje treba pretopiti.

$$m_U = 1210 \text{ kg}$$

Kao talionički agregat koristiti će se prekretni peći na lož ulje. Svaka peć ima kapacitet od 100 L taline odnosno 750 kg. Prema tome za lijevanje kape treba pripremiti dvije šarže od 610 kg.

$$m_{\text{š}} = 610 \text{ kg}$$

Ukupno iskorištenje mase materijala za lijevanje:

$$\eta = \frac{m_{\text{go}}}{m_U} \cdot 100\% = 35\%$$

Za materijal kape koristimo leguru CuAl10Fe5Ni5 (EN 1982) sa sljedećim sastavom:

Element	maksimum i minimum %
Cu	76 - 83
Al	8,5 - 10,5
Fe	4 - 5,5
Ni	4 - 6
Mn	max 3
Si	max 0,1
Cr	max 0,05
Pb	max 0,03
Mg	max 0,05
Zn	max 0,5
Bi	max 0,01
Sn	max 0,1

Tablica 2 Norme kemijskog sastava CuAl10Fe5Ni5 legure prema EN 1982 standardu.

Temperatura taljena te legure je oko 1050 °C, a temperatura uljevnja oko 1150 °C.

Za lijevanje zahtjevnih odljevaka treba slijediti neka pravila o odabiru materijala.

1) Maksimalan dopuštena količina metalne strugotine u šarži je 25 %. Određena količina strugotine je poželjna da se smanji vjerojatnost oštećenja tignja u peći tokom šaržiranja, ali prevelika količina povećava količinu plinova otopljenih u talini što može rezultirati škartiranjem odljeva.

2) Nikal se dolegirava sa predlegurom sastava 30% Ni i 70% Cu.

3) Aluminiij se dolegirava predlegurom sastava 50% Al 50% Cu.

4) Nužno je izbjegavati direktno korištenje otpadne bronce bez prethodnog pretapanja u blok

### **3.5. Bilanca utroška radnog vremena**

Na temelju prijašnjih lijevanja odljevaka istog tipa može se napraviti procjena utrošenog rada potrebnog za pojedinačno proizvodnju kape broskog vijaka.

Rad kalupera za izradu kalupa i jezgre:

2 radika ukupno 20 h

Rad bravara za izradu armature i prilagodbu kalupnica:

2 radnika ukupno 15 h

Rad pećara za šaržiranje peći i lijevanje:

4 radnika ukupno 8 h

Rad u čistionici:

1 radnik 4 h

Rad u strojnoj obradi:

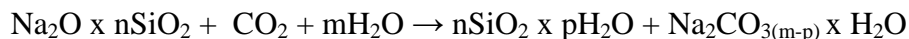
1 radnik 4 h

## **4. Opis postupka lijevanja kape broskog vijka**

### **4.1. Postupak kalupljenja**

#### **4.1.1. Priprema CO<sub>2</sub> pijeska**

Postupak CO<sub>2</sub> je baziran na vezanju pješčanih čestica natrijevim silikatom (još poznato kao vodeno staklo ili sigel) koji se očvršćuje pomoću CO<sub>2</sub> plina. Kemijski mehanizam skrućivanja natrijeva silikata je:



Početna smjesa natrijevog silikata ima određeni modul M kojim predstavlja odnos SiO<sub>2</sub> i Na<sub>2</sub>O. M varira od 1,5 do 4, a o njemu ovisi gustoća i viskoznost natrijevog silikata.

Natrijev silikat se dodaje u pijesak u iznosu od 3 do 8 % mase pijeska, te se miješa kojih 5 minuta prije nego što je spreman za kalupljenje. Uz natrijev silikat koji put se u smjesu dodaju i drugi materijali koji olakšavaju istresanje kalupa u toku čišćenja, ili propusnost plinova. U našem slučaju ne trebamo takve dodatke.

#### **4.1.2. Priprema premaza za kalup**

Premazi sadržavaju cirkonijev silikat ili metalne okside. Njihova funkcija je spriječiti prodor metala u poroznu strukturu pješčanog kalupa, ljepljenje kalupnog pijeska za odljevak, te redukcija površinske hrapavosti odljeva.

Za premaz koristimo TENOCOATING ZBBP 16 na bazi alkohola. Taj premaz je unaprijed pripremljena mješavina koja ne zahtjeva dodatno razrjeđivanje u ljevaonici, te se može koristiti direktno iz pakiranja. Ako pripremljeni premaz stoji duže vrijeme bez upotrebe potrebno ga je promiješati prije premazivanja kao se komponente koje su se pri stajanju nataložile na dno ravnomjerno raspršile u alkoholnoj suspenziji.

#### **4.1.3. Formiranje pješčanog kalupa i jezgre**

Kalupljenje je daleko najsloženija faza lijevanja kape broskog vijka, te predstavlja najveći utrošak radnog vremena u cijelom procesu. Postupak se provodi u nekoliko faza koje treba provesti pravilnim redoslijedom kako bi se osiguralo uspješno konačno sklapanje kalupa.

Za početak kalupljenja potrebno je očistiti radu površinu. U centar postavljamo model oslonca jezgre sa naličjem okrenutom prema gore. Preko oslonca jezgre postavljamo donju kalupnicu visine 200 mm. Na otvore za uklanjanje modela oslonca jezgre postavljamo prstene/cijevi kako bi spriječili zatvaranje tih otvora, osigurali kasnije lakše vađenje modela oslonca jezgre i omogućili fiksiranje jezgre za armaturu donje kalupnice. Konačno u dva nasuprotna kuta kalupnice postavljamo dva cilindra visine oko 150 mm, te ih prekrivamo kako bi spriječili da se napune pijeskom.



Slika 37. Početna faza kalupljenja donje kalupnice.

Tako pripremljeni model oslonca jezgre posipavamo prahom za lakše odvajanje modela iz pijeska, nakon čega može se krenuti sa punjenjem kalupnice pijeskom koji je prethodno pripremljen za skrućivanje CO<sub>2</sub> metodom. Važno je napomenuti da, za razliku od punjenja kalupa prirodnim pijeskom, punjenje kalupa pijeskom za CO<sub>2</sub> metodu ne zahtjeva dodatnu kompresiju i nabijanje pijeska. Pijesak se natrpava lopatama i poravnava bez korištenja kompresora ili ručnih alata za nabijanje. Između dvaju otvora na osloncu jezgre potrebno je ručno očistiti kanal pijeska do razine armature kalupince, kako što je to vidljivo na slici niže.

Nakon što je kalupnica napunjena i poravnana potrebno je u pijesku napraviti mrežu otvora za upuhivanje CO<sub>2</sub> plina. Ta serija otvora se izrađuje probadanjem površine kalupa komadom žice promjera oko 6 mm u pravilnim razmacima svakih 100 do 150 mm. Nakon toga slijedi skrućivanje kalupa upuhivanjem CO<sub>2</sub> iz plinskih boca kao što je prikazano nas slici 38. U svaki otvor plin se upuhuje tipično 15 do 30 s.





Slika 38. Upuhivanje CO2 u pješčanu smjesu.

Nakon završetka procesa skrućivanja donju kalupnicu je potrebno okrenuti. Proces okretanja i pomicanja kalupa i kalupnica napunjenih pijeskom je kritičan jer pješčani kalupi ne podnose udarce, trešnju i neravnomjerne pritiske. Za okretanje se koriste hvatišta zavarena na bokovima kalupnica. Os između tih hvatišta prolazi otprilike kroz centar mase kalupnice te se cijela kalupnica može balansirano okretati oko te osi dok je ovješena lancima za dizalicu.

Nakon okretanja potrebno u otvorima koje smo ostavili u uglovima kalupnice izmodelirati klinove za centriranje kalupnica. Kao što je vidljivo na slici do se radi tako što se u otvore postave drveni klinovi, te napune pijeskom, i poravnaju.



Slika 39. Postavljanje klinova za centriranje.

Sljedeći korak je postavljanje i centriranje modela kape na model oslonca jezgre. Pravilno centriranje modela i jezgre je od izuzetne važnosti jer je stijenka same kape relativno tanka, samo 20 milimetra, te i mala odstupanja položaja modela i jezgre, od svega par milimetara, mogu izazvati velike varijacije debljine stijenke konačnog odljeva. U svrhu pravilnog centriranja oslonac jezgre ima dva zatika koja se vide na slici.



Slika 40. Oslonac jezgre sa zaticima za centriranje.

Svakom od ta dva zatika odgovaraju dva otvora na poledini modela kape brodskog vijka.



Slika 41. Utor za zatike u modelu kape





Slika 42. Model kape centriran na donju kalupnicu.

Nakon postavljanja i centriranja modela možemo postaviti preko njega srednju kalupnicu visine 300 mm. Zatim u pravilnim razmacima oko modela postavljamo 6 cijevi koje to formirati pojila za napajanje odljeva, te dva uža drvena modela koji će formirati dva spusta uljevnog sustava.



Slika 43. Srednja kalupnica pije punjenja pijeskom.

Budući da se radi o maloserijskoj proizvodnji elementi za napajanje i uljevni sustav se improviziraju kombinacijom standardnih modela za uljevni sustav, i zavarenih segmenata cijevi koji se postavljaju u odgovarajućim pozicijama u kalupu, te kasnije ručno dorađuju u traženu formu uljevnog sustava.





Slika 44. Improvizirani modeli pojila u kalupu.

Nakon postavljanja svih elemenata uljevnog sustava, i posipavanja prahom za lakše kasnije odvajanje modela, srednja kalupnica se može napuniti pijeskom i poravnati na isti način kao što je to urađeno i sa donjom kalupnicom. U dva kuta postavimo klinove za centriranje.



Slika 45. Srednja kalupnica nakon punjenja pijeskom i poravnavanja

Tada možemo ukloniti šest cijevi koje formiraju pojila odljeva, te dva modela koji formiraju spust. Sljedeći korak je izrada mreže otvora za  $\text{CO}_2$ , te skrućivanje kalupa upuhivanjem  $\text{CO}_2$  u pijesak gornje kalupnice, na isti način koji je učinjeno u donjoj kalupnici.





Slika 46. Upuhivanje CO<sub>2</sub> u otvore na pijesku u srednjoj kalupnici.

Iduća faza je kalupljenje gornje kalupnice. Gornju kalupnicu postavljamo i centriramo na srednju kalupnicu. Za formiranje uljevnog sustava vraćamo modele spusta u njihove otvore u srednjoj kalupnici. U centar modela kape postavljamo standardni model pojila otvorenog tipa, dok šest bočnih pojila zatvorenog tipa završavamo standardnim modelima visine oko 150 mm. Pri tome treba paziti da su otvori pojila u srednjoj kalupnici posve prekriveni kako se spriječili punjenje istih pijeskom prilikom punjenja gornje kalupnice.



Slika 47. Gornja kalupnica spremna za punjenje pijeskom.



Na svaki od šest zatvorenih pojila se postavlja vertikalna šipka promjera 8 mm koja će formirati odušnicu pojila . Konačno možemo srednju kalupnicu zaprašiti prahom za lakše odvajanje, te početi usipavati pijesak u gornju kalupnicu.



Slika 48. Punjenje gornje kalupnice pijeskom



Slika 49. Poravnavanje pijeska gornje kalupnice.

Zatim možemo ukloniti model srednjeg pila, modele spusta i šipke za odušnice. Slijedi skrućivanje pijeska CO<sub>2</sub> postupkom, izradom mreže otvora i upuhivanjem CO<sub>2</sub> na isti način kako je to ranije opisano.

Sljedeći korak je kalupljenje uljevnih čaša i produžetka centralnog pojila. Svaki od tih komponenata će imati zasebnu kalupnicu. Produžetak centralnog pojila koristi kalupnicu dimenzija 200 x 400 x 550 mm, dok su kalupnice uljevnih čaša više (300 x 400 x 550 mm) kako bi se smanjila opasnost od prelijevanja taline prilikom ulijevanja.

Za produžetak centralnog pojila prvo moramo vratiti model pojila u otvor gornje kalupnice. Zatim u blizini modela pila, na površini gornje kalupnice, ručno se izdube dva konusna otvora dubine ~50 mm koja će služiti za kasniju centraciju kalupnice centralnog pojila pri ponovnom sklapanju kalupa. Nakon toga postavljamo kalupnicu 200 x 400 x 550 mm u centar kalupa i napunimo ju pijeskom. Slijedi izrada otvora za CO<sub>2</sub> i upuhivanje sitih.

Na sličan način izradimo i dvije kalupnice za čaše uljevnog sistema. Prvo vratimo model spusta u otvor spusta na gornjoj kalupnici, ručno izdubimo otvore za centriranje, postavimo dvije kalupnice dimenzija 300 x 400 x 550 mm oko svakog spusta, pazeći pritom da ne prekrivaju neku od odušnica unutarnjih pojila, postavimo standardne modele čaše uljevnog sustava u svaku kalupnicu, te ih napunimo pijeskom. Konačno ih možemo očvrnuti CO<sub>2</sub> postupkom.

Time je formiranje kalupa gotovo, te je idući korak razdvajanje svih kalupnica te vađenje modela iz njih. Kao i u svakom koraku koji zahtjeva pomicanje i okretanje pješčanih kalupa potreban je oprez, te velika slobodna i očišćena površina za njihovo odlaganje. Srednja i gornja kalupnica se odlažu sa poledinom prema gore, na za to pripremljene potklade. Oslanjanje je dopušteno isključivo na metalne rubove kalupnice, nikako ne na pješčanu površinu. Manje kalupnice se odlažu na bok.

Nakon otvaranja kalupa se izvodi i veći dio ručne dorade uljevnog sustava, ponajprije oblikovanje razvodnika ušća u srednjoj kalupnici.



Slika 50. Gotove kalupnice centralnog pojila i čaša uljevnog sustava nakon paljenja premaza.



Uz formiranje kalupa potrebno je formirati i jezgru. Za formiranje jezgre koristimo dvodijelni jezgrenik. Uži dio jezgrenika, koji formira oslonac jezgre, može se odvojiti da bi se cijela jezgra mogla izvaditi iz kalupa kada je gotova.

Postupak formiranja jezgre počinje sa postavljanjem sastavljenoga jezgrenika, sa otvorom prema gore, na radnu površinu. Jezgrenik je tada potrebno dobro zaprašiti radi kasnijeg lakšeg vađenja jezgre. Zatim na dno jezgrenika postavljamo nekoliko centimetara tanka sloj pijeska koji će formirati gornju površinu jezgre, i osigurani dovoljno debeli sloj pijeska između taline i armature jezgre. Na taj tanki sloj pijeska se postavlja armatura jezgre, te nastavlja punjenje jezgrenika pijeskom do otprilike  $\frac{1}{3}$  do  $\frac{1}{2}$  visine jezgreika. Onda, radi olakšanja jezgre, i kasnijeg fiksiranja jezgre za donju kalupnicu, u sam centar jezgre postavljamo model cilindričnog oblika, nakon čega možemo napuniti jezgrenik do vrha i poravnati ga. Uz poravnavanje potrebno je oko centralnog otvora ručno iskopati dio pijeska toliko za se otvori pristup armaturi. Ta izložena armatura će služiti kao hvatišta za ukrućivanje jezgre za donju kalupnicu.

Skrućivanje jezgre se provodi CO<sub>2</sub> postupkom. Zato je potrebno izbušiti mrežu kanala za upuhivanje CO<sub>2</sub> plina na isti način kako je to urađeno pri formiranju kalupa.



Slika 51 Jezgrenik sa jezgrom. Donji prsten jezgrenika se vidi u gornjem lijevom kutu.

Nakon toga jezgra se pažljivo okreće. Poslije okretanja može se ukloniti gornji dio jezgrenika. Kako bi mogli podignuti jezgru iz donjeg dijela jezgrenika, i omogućili da se jezgra ovjesi o



dizalicu, potrebno je na gornjoj površini jezgre u pijesku ručno iskopati 4 simetrična otvora, tako da se se izloži dovoljna površina armature jezgre za postavljanje kuka za manipulaciju.



Slika 52. Premazana jezgra prilikom paljenja. Vidljive su kuke za manipulaciju.

U ovoj fazi, kada imamo formirani i rastavljeni kalup, te formiranu jezgru, možemo početi sa premazivanjem. Prije samog premazivanja nužno je dobro očistiti sve dijelove koji će se premazivati mlazom komprimiranog zraka kako bi se uklonile slobodne čestice pijeska. Potrebno dobro premazati sve dijelove kalupa koji će doći u kontakt sa talinom. Premazivanje se izvod kistom ili preljevanjem.

Za nanošenje kistom mogu se koristiti obični sobsolikarski kistovi, te je poželjno da su što mekši i veći radi boljeg naljezanja premaza i bržeg rada. Nanošenje kistom se upotrebljava za premazivanje dijelova kalupa koji su zbog svoje veličine i oblika nepodobni za pretapanje, dakle donja, srednja i gornja kalupnica.

Preljevanje je brži postupak gdje se premaz prelije preko premazivane površine. Uz što je brži prelijevanje ima i prednost što može prekriti uske kanale, kao što je spust uljevnog sustava, koji su zbog dimenzija nedostupni za premazivanje kistom. Idealno prelijevanje se izvodi iznad korita u koji će se suvišni premaz ocijediti kako bi se mogao kasnije ponovo upotrijebiti. Nažalost prelijevanje uskih kanala spusta u srednjoj i gornjoj kalupnici se ne može obaviti iznad korita, niti su dohvativi kistom, pa se ocijeđeni premaz gubi na podu ljevaonice.

Prilikom premazivanja treba paziti na količinu pijeska koji završava u premazu. Bilo da se premazivanje obavlja kistom, ili prelijevanjem iznad korita, određena količina slobodnih čestica pijeska se može akumulirati u preljevu. Ukoliko ih se nagomila previše premaz može postati sipljiv.

Nakon završetka premazivanja premaz je potrebno zapaliti. Pri tome treba osigurati da sav premaz na površini kalupa izgori jer neizgoreni alkohol na površini kalupa može izazvati oštećenja kalupa i poroznost odljeva.



Slika 53. Prelijevanje kalupa čaše uljevnog sustava.





Slika 54. Premazivanje donje kalupnice kistom.



Slika 55. Paljenje premaza.



Slika 56. Paljenje premaza u uljevnoj čaši.

Nakon što je paljenje premaza završeno može se početi sa slaganjem kalupnice i jezgre u konačni kalup. Za to se pripremi postelja od tankog sloja pijeska.



Slika 57. Postelja za konačno slaganje kalupa.



Da poboljšamo brtvljenje između elemenata kalupa (jezgre i kalupnica) prije njihovog slaganja koristimo staklarski kit. On se pripremi u dugačke "špagete" promjera par milimetara. Te trake kita se postavljaju par centimetara od ruba kalupne šupljine na kontaktnoj površini između kalupnica, te u oslonac jezgre donje kalupnice u koju će nasjedati jezgra.

Na postelju se postavlja donja kalupnica. U nju se pažljivo centrira jezgra. Nakon sklapanja jezgre i donje kalupnice cijeli sklop se podiže dizalicom tako da se omogući pristup donjem dijelu sklopa gdje se jezgra u šipkom i maticama fiksira za armaturu donje kalupnice. Nakon što je jezgra fiksirana možemo donju kalupnicu odložiti nazad na pješčanu postelju.

Tako pripremljene kalupnice slažemo odgovarajućim redom pazeći pri tome da ih dobro centriramo, i da ih ne oštetimo pri manipulaciji. Prije spajanja donje kalupnice sa srednjom kalupnicom potrebno je ubaciti filtre za šljaku u njihova mjesta. Konačno se sklopljeni kalup optereti odgovarajućom masom utega, pritom pazeći da utezi ne prekrivaju neke od doušnica, i ne ometaju ulijevanje taline. Time je kalup spreman za lijevanje.

#### **4.2. Priprema šarže i taljenje materijala**

Prije početka taljenja potrebno je pripremiti uložak peći. Uložak (sav materijal koji će se taliti u peći) se slaže na metalne palete i kontejnere, ovisno o njihovom tipu. Sipkasti materijal (metalna strugotina iz strojne obrade) ide u kontejnere, a komadni materijal, kao što je blok legura i predlegura, postavlja se na metalne palete. Kontejneri i palete moraju imati odgovarajuća hvatišta za manipulaciju dizalicom.

Pri pripremi materijala za taljenje potrebno je obratiti posebnu pažnju na vlažnost uloška. Taljenje vlažnog materijala povećava količinu otopljenih plinova u talini, osobito vodika koji je jako štetan u bakrenim legurama, što može izazvati poroznost i škartiranje konačnog odljeva. U ekstremnim slučajevima naglo dodavanje vlažnog materijala u vruću peć može izazvati eksploziju zbog naglog isparavanja i ekspanzije vode, a samim time oštećenje opreme i ozljede radnika u talionici. Ukoliko se sumnja da materijal nije zadovoljavajuće suh potrebno ga je prije ubacivanja u peć zagrijavati da sva vlaga iz njega ispari na siguran način.

Prije početka šaržiranja peći potrebno je peć zagrijati na radnu temperaturu od minimalno 1300 °C. Nakon zagrijavanja peći materijal se ulaže specifičnim redoslijedom. Prvo se uvijek ubacuje sipki materijal, odnosno strugotina strojne obrade. Tako se na dnu peći stvara zaštitni sloj koji će ublažiti eventualne udarce pri šaržiranju, i osigurati ravnomjerniji pritisak težih komada uloška na stijenku tignja peći. Nakon ubacivanja sipkog materijala možemo krenuti sa dodavanjem težih komada koji se moraju umetati sa velikim oprezom jer su stjenke tignja zagrijane na radnu temperaturu slabo podnose udarce i jake lokalne pritiske.

Samo taljenje se obavlja u slabo oksidacijskoj atmosferi (to znači da lož ulje izgara sa laganim pretećkom zraka, i može se prepoznati po sjajnom zelenom plamenu koji izlazi iz peći) te može trajati i do dva sata, ovisno o tipu uloška.

Uz sam materijal šarže u samu talinu, u raznim fazama taljenja, ili prije samog ulijevanja, možemo dodavati razne preparate koji poboljšavaju livljivost, uklanjaju otopljeni vodik, deoksidiraju talinu, ili pomažu segregaciju šljake. Sastav preparata ovise o sastavu uloška i o korištenom talioničkom agregatu. Sami proizvođači specificiraju u kojim količinama i u kojoj fazi se dodaje pojedini preparat.

U našem slučaju koristimo sljedeće preparate:

ALBRAL 2 (TOXIC) - dodatak koji poboljšava segregaciju šljake i stvara zaštitni sloj na površini taline koji štiti talinu od stvaranja oksida. Preparat se dodaje u dvije do tri faze. Na samom početku taljenja, kada se stvori prvi sloj otopljenog metala na dnu peći, dodaje se 0,5 kg preparata na 100 kg ukupne veličine šarže. Po potrebi u toku taljenja se može dodati dodatna količina preparata ako zaštitni sloj na površini postane pre viskozozan ili nepotpun.

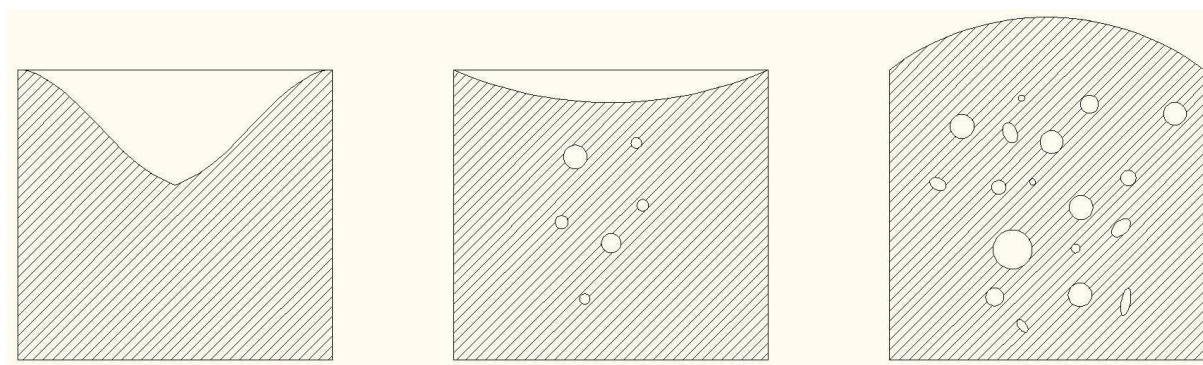
Pri kraju taljenja, kojih 5 minuta prije izljevanja taline iz peći, dodaje se dodatnih 0,25 kg preparata po 100 kg šarže. Taj dodatak se lijavačkim zvonom potapa do dna šarže te intenzivno promiješa. Nakon dodavanja preparata, ali prije samog uljevanja, potrebno je ostaviti talinu na miru par minuta da sva šljaka ispluta na površinu.

Netom prije prelijevanja taline iz prekrutne peći u lijevački lonac čisti se šljaka sa površine taline. Pri prelijevanju u mlaz pri taline se dodaje se još 0,25 kg preparata po 100 kg šarže.

LOGAS 50 - je preparat u obliku briketa koji služi otplinjavanju, odnosno uklanjanju vodika iz taline. Preparat se dodaje u količini od oko 100 g po 100 kg taline. Ubacuje se nakon gašenja peći, dakle kratko prije početka pražnjenja. Samo dodavanje preparata ubrzava hlađenje metala pa je potrebo osigurati da je metal u peći bude prije tretiranja zagrijan na dovoljno visoku temperaturu tako da nakon tretmana temperatura bude dovoljno visoka za lijevanje. Briketi preparata se potapaju pomoću zvona na dno taline gdje se ostavljaju ta stvaraju mjehure inercijalnog plina koji pomažu uklanjanju otopljenog vodika iz taline. Za šarže naše veličine (do 750 kg) taj proces bi trebao trajati oko 5 minuta. LOGAS 50 je najbolje dodati u drugoj fazi tretiranja taline sa ALBRAL 2, jer se oboje izvode nekih 5 minuta prije prelijevanja taline peći u lijevačke lonce.

DEOX TUBES E3- preparat služi uklanjanju otopljenog kisika iz taline. Dolazi u tabletama koje se ubacuju u talinu kojih pet minuta prije izlivanja taline iz peći, slično ako i dodavanje LOGAS 50. U šaržu veličine 750 kg aluminijske bronce dodajemo 15 tableta.

Prije samog lijevanja poželjno je napraviti brzu kontrolu količine otopljenih plinova u talini. Talina tipično ima veću sposobnost otapanja plinova pri višim temperaturama. Zbog toga pri hlađenju taline dolazi to izlučivanja otopljenih plinova u obliku mjehurića koji izazivaju poroznost. Testiranje se izvodi ulijevanjem uzorka metala u pokusne kalupe promjera 50 mm i visine oko 75 mm. Ako je materijal pravilno deoksidiran zbog stezanja materijala pokusni odljevak će imati izraženo stožasto udubljenje. Ukoliko odljevak ima ravnu slobodu površinu, ili konveksnu površinu, znači da je došlo do izlučivanja mjehurića plinova koje su spriječili pravilno skupljanje metala, te je metal potrebno dodatno deoksidirati.



Slika 58. Odnos veličine usahline i poroznosti uzorka

### 4.3. Ulijevanje taline

Prije početka lijevanja treba osigurati da lijevački lonci koji će se koristiti za ulijevanje budu suhi i zagrijani. U našem primjeru to je najjednostavnije postići postavljanjem lonca na peć tokom taljenja materijala, sa otvorom lonca okrenutim prema dolje preko ispušnog otvora peći. Pri tome treba paziti da zračnost između lonca i otvora poklopca peći bude dovoljno velika za omogućiti neometani izlaz plinova izgaranja. Tipično postavljanje metalnih profila dimenzija oko 50 do 100 mm između poklopca i lonca kojeg grijemoosigurava dovoljnu zračnost. Lonci se uklanjahu kojih 10 minuta prije kraja procesa taljenja kako bi se na peći mogle neometano obaviti završne radnje tretiranja taline koje smo ranije opisali.

Proces ulijevanja počinje izlivanjem sadržaja peći u lijevački lonac. Prilikom izlivanja u mlaz taline se dodaje ALBRAL 2 kako je to ranije pisano. Budući da se lijevanje u naš kalup izvodi na dva spusta za ulijevanje koristimo dva lonca sa jednakim sadržajem taline. Svaki lonac se postavlja na odgovarajuću poziciju u odnosu na kalup, te ja za manipulaciju svakim loncem potrebna zasebna dizalica.

Pred sam početak lijevanja iz lonca se uklanja šljaka, te mjeri temperatura taline. Ulijevanje se izvodi istodobno u oba spusta. Radi sprečavanja stvaranja vrtloga uljeve čaše su začepljenje u trenutku samog početka ulijevanja, a čepovi se uklanjaju kad se otvor spusta u čaši prekrije talinom. Poželjno je štopericom mjeriti vrijeme ulijevanja radi moguće kasnije analize potencijalnih uzroka škarta. Nakon završetka lijevanja, ili netom prije lijevanja, potrebno je iz lijevačkog lonca izdvojiti uzorak materijala za analizu kemijskog sastava. Taj uzorak se obično odlije u malu kokilu dimenzija  $\Phi$  40 x 80 mm.

Odmah nakon završetka ulijevanja taline otvor centralnog pojila se prekrije egzotermnom smjesom (lunkerit) koja se u kontaktu sa talinom spontano zapali i stvara zaštitni sloj koji usporava skrućivanje pojila, te na taj način poboljšava njegovu funkciju.

Odvije valja napomenuti ta je proces manipulacije talinom izvan peći, te samo ulijevanje, daleko najopasnija faza izrade odljeva. Uz opasnost prosipanja taline prije i tokom ulijevanja postoji određena opasnost i od "probijanja" kalupa zbog nepravilnog kalupljenja, oštećenja kalupa ili nedovoljnog opterećenja kalupa utezima.

### 4.4. Čišćenje

Nakon završetka procesa skrućivanja može se započeti sa procesom čišćenja. Proces čišćenja proizvodu veliku količinu otpada, ponajviše pijeska i prašine, tako da prostor za čišćenje treba imati dobru ventilaciju i omogućiti laki odvoz otpada. Oprema za čišćenje je relativno jednostavna, uključuje cirkulare za rezanje i šipke za raskopavne pijeska, te dizalice ili viljuškare za manipulaciju teškim odljevom.

Pomoću viljuškara kompletan kalup se uznosi iz lijevaonice na prostor predviđen za čišćenje. Šipkama se razbija pijesak kalupa nakon čega možemo razdvojiti odljevak i kalupnice. Vađenje jezgre je obično nešto teže te također počinje za razbijanjem pijeska pomoću šipke te čupanjem armature jezgre iz odljeva.

Nakon što sa odljeva ukloni većina pijeska možemo odrezati pojila i uljevani sustav. Usput se odreže i srh koji će se u pravilu stvoriti na spojevima kalupnica. Sav odvojeni metal se može upotrijebiti za buduća lijevanja, te se ne smatra otpadom već vrlo vrijednom sirovinom.



Slika 59. Čišćenje odljeva.

Nakon uklanjanja suvišnog metala odljevak se očisti od ostatka pijeska i predaje na skladište gdje će čekati trojnu obradu.

Pijesak se odvozi na za to predviđeno odlagalište otpada, gdje će čekati kasnije zbrinjavanje u deponiju ili reciklažu.



## 5. Strojna obrada odljeva

Prvo možemo definirati tri stupnja strojne obrade odljeva:

**Sirovi odljevak:** odljevak nakon čišćenja koji nije prošao nikakvu strojnu obradu osim odrezivanja elemenata uljevnog sustava, pojila i srhova.

**Grubo obrađeni odljevak:** odljevak je prošao strojnu obradu radi uklanjanja površinskog sloja oksida sa odljeva, te smanjenja ljevačkih dodataka, ali nije obrađen na konačne mjere, tolerancije ili kvalitete površine.

**Finalizirani odljevak:** odljevak koji je prošao kompletnu strojnu obradu predviđenu prije montaže, te je spreman za montažu.

Kapa broskog vijka je element broda koji prolazi kroz minimalnu strojnu obradu, koja se sastoji primarno od tokarenja prirubice kao bi pravilo brtvila u dodiru sa glavinom broskog vijka, te bušenja rupa na prirubnici i plaštu kape. Većina te obrade će se obaviti u brodogradilištu prije montaže, dok će se u ljevaonici obaviti samo gruba obrada.

Prilikom modeliranja odljeva na kritične dijelove odljeva se doda određena količina dodatka materijala. To su u pravilu dijelovi koji su zahtjevniji u pogledu kvalitete površine, odnosno koji se ne mogu montirati u sirovom obliku već zahtijevaju naknadnu strojnu obradu.

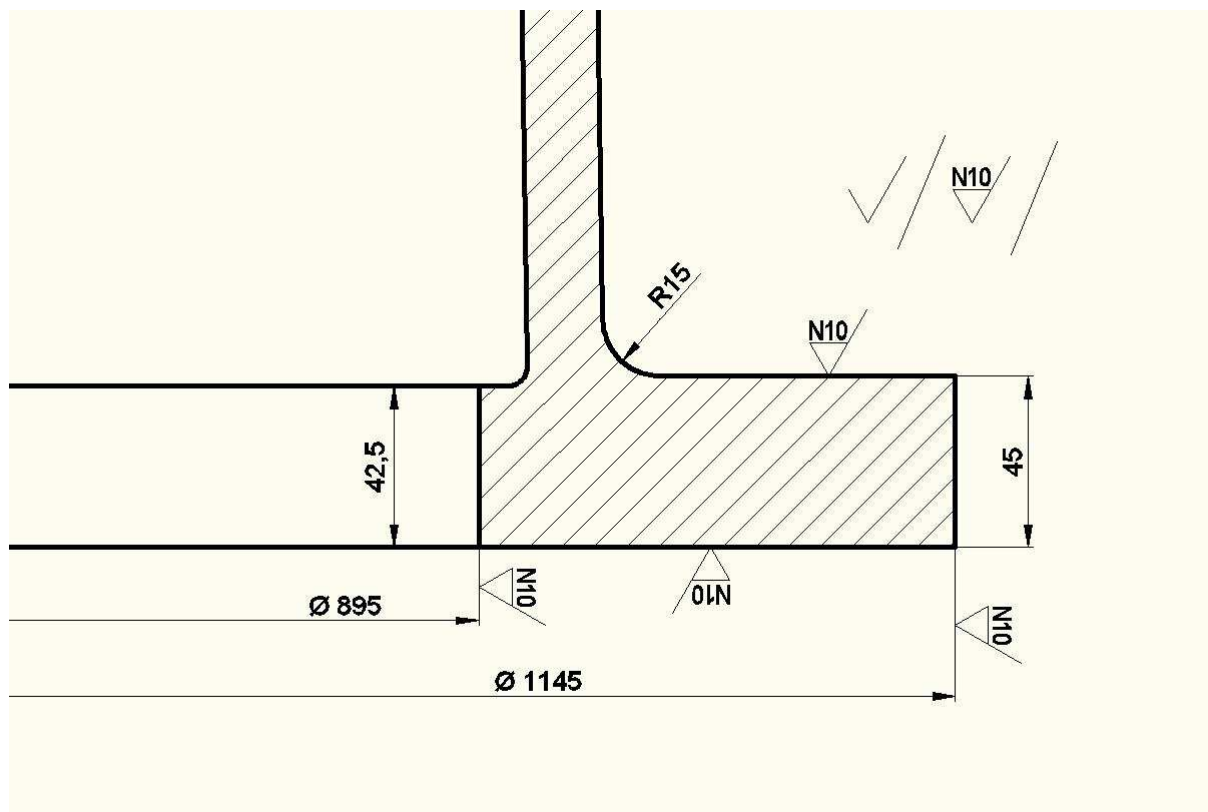
Primarni cilj grube strojne obrade je smanjenje tih dodataka na svega par milimetara iznad vrijednosti konačnih kota. Time se skida tvrdi i nehomogeni sloj oksida koji nastaje na površini odljeva. U pravilu treba izbjegavati obradu tog površinskog sloja sa strojevima koji su namijenjeni za finalnu obradu jer se time smanjuje njihov radni vijek. Taj dio obrade poželjno je obaviti na starijim sojevima, ostavljajući za finalnu obradu dodatak od samo par milimetara čistog metala.

Dodatna korist grube strojne obrade prije isporuke je smanjena masa odljeva koji se isporučuje kupcu, te time i cijena samog odljeva koju kupac mora platiti. Slično sa strane ljevaonice materijal koji se skine sa odljeva u procesu strojne obrade je sirovina koja se može kasnije ponovo upotrebiti. Budući da je vrijednost tako ušteđenog materijala u pravilu veća od cijene rada strojne obrade to za ljevaonicu smanjuje ukupne troškove proizvodnje odljeva.

Sekundarni cilj grube strojne obrade je otkrivanje potencijalnih grešaka u odljevu. Dobar dio grešaka koje mogu nastati pri lijevanju nisu vidljivi vizualnom inspekcijom površine sirovog odljevka, ali se mogu lako otkriti kada se skine površinski sloj oksida. Tipične greške koje se tako otkrivaju su poroznost, razrijeđenost strukture, te uključci šljake. Osim toga poželjno je obaviti strojnu obradu odljeva ako će se na odljevu izvoditi ispitivanja homogenost ultrazvukom, te nužno ako će se provoditi ispitivanje penetrantima.

Zbog svega toga u interesu je ljevaonice da obavi grubu strojnu obradu unutar same ljevaonice čak i kada je kupac spreman kupiti samo sirovi odljevak.

Dodatak za grubu obradu na prirubnici kape je 5 mm. To daje po 2,5 mm dodatka po plohi. Poželjno je da kvaliteta površine poslije grube obrade bude barem N10 ili bolja jer glada površina omogućava lakšu detekciju grešaka u odljevu.



Slika 60. Dimenzije grube obrade prirubnice kape.

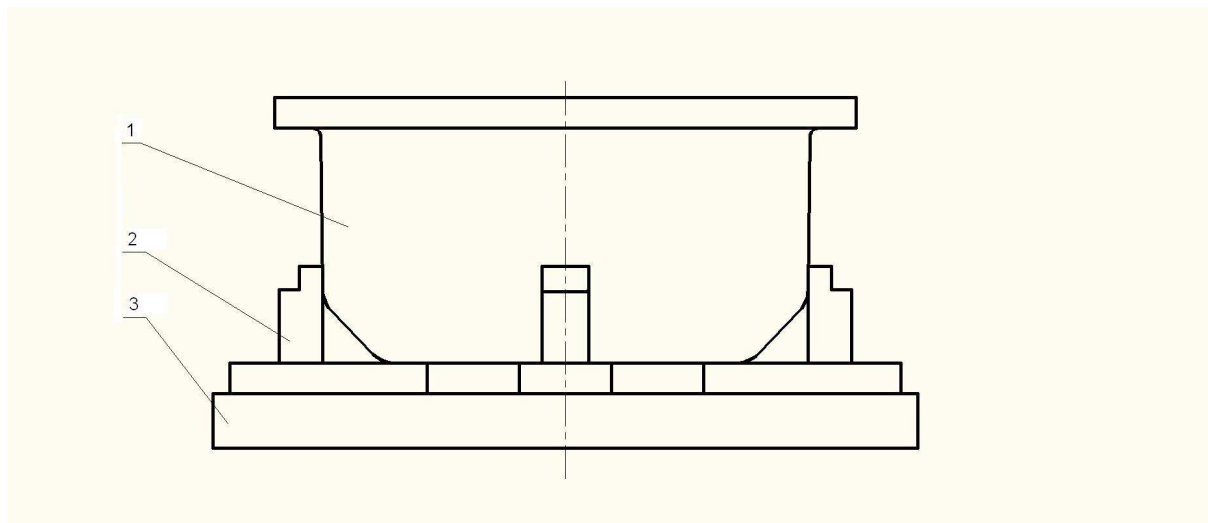
Za strojnu obradu ovog komada se koristiti karusel tokarski stroj sa plan pločom dovoljno velikom da za obradu odljevaka promjera  $> 1200$  mm i viših od 600 mm. Karusel mora imati odgovarajuću dizalicu za manipulaciju odljevom, te pištolje za komprimirani zrak koji su nužni za temeljito čišćenje radnog prostora. Radni prostor također mora biti dostupan vuljuškaru te mora biti adekvatno ograden od susjednih strojeva kako bi se spriječilo miješanje strugotine nastale strojnom obradom sa strugotinom sa susjednih strojeva.

Prije početka tokarenja bitno je osigurati ta su radni stroj, oprema i okolica radnog stroja temeljito očišćeni od bilo kakvog materijala koji je prethodno obrađivan na u tom radnom mjestu. To je nužna operacija za održavanje rentabilnosti proizvodnje u ljevaonicama jer osigurava da će strugotina nastala strojnom obradom biti poznatog kemijskog sastava, te da će se kasnije moći reciklirati kao sirovina za lijevanje.

Pri obradi brončanih odljevaka se nastoji izbjegavati korištenje emulzije za hlađenje i podmazivanje jer bi ta emulzija (smjesa vode i ulja) zagađila strugotinu nastalu strojnom obradom. Emulzijom zagađena strugotina nije pogodna za direktno korištenje kao sirovina za talionicu već se mora sušiti, a čak i tada zaostaci ulja izazivaju povećao čuđenje pri taljenju, te povećavaju vjerojatnost škarta zbog nečistoća i otapanja plinova u talini. Smatra se da je nešto manja brzina rezanja i nešto brže tupljenje noževa isplativije nego stvarati probleme u reciklaži strugotine. Jedini izuzetak kada se koristi emulzija je operacija odrezivanja komada, koji se u našem slučaju obrade kape propelera neće koristiti.

Kapa će se tokariti sa licem postavljenim nad plan ploču i naličjem otvorenim prema gore, kako je vidljivo na skici. Taj položaj omogućuje pristup suporta u otvor kape za unutarnje tokarenje. Problem sa ovom pozicijom je da naša izvedba kape ima zakošeni obod lica u dužini od 120 mm što otežava stezanje kape na plan ploču. zato moramo koristiti pakne koje imaju dovoljno visoke stezne čeljusti da prihvate kapu na manje zakošenom dijelu plašta.

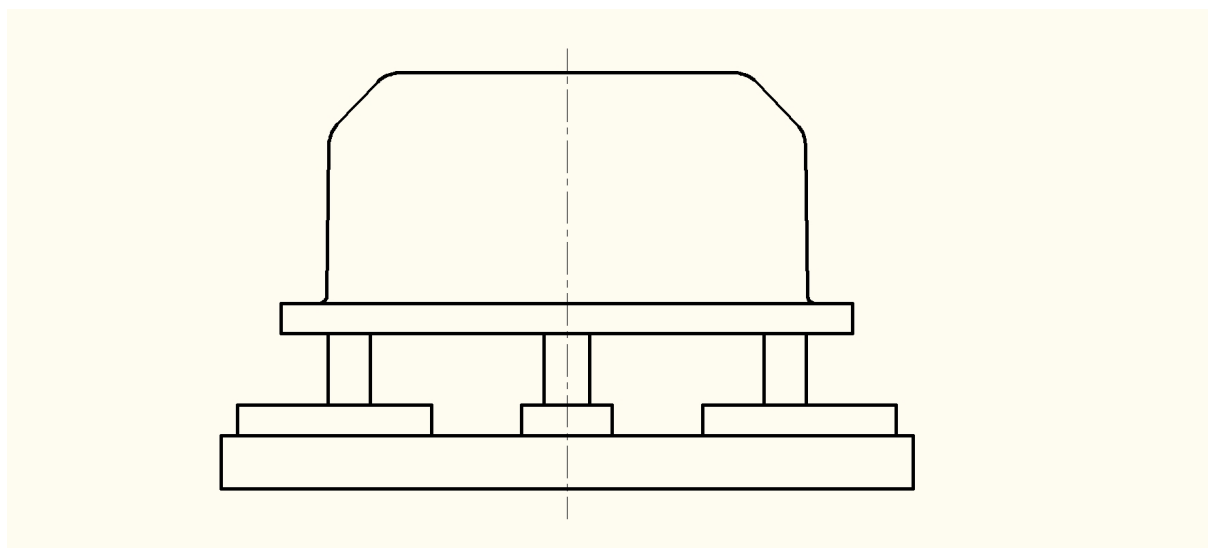
Za postavljanje kape na plan ploču može se koristiti viljuškar ili dizalica. Nakon postavljanja potrebno je kapu dobro centrirati i stegnuti.



Slika 61. Položaj kape na planskoj ploči karusela u u prvoj fazi tokarenja. 1-plan ploča, 2-pakne, 3- kapa brodskog vijka.

U prvoj fazi tokarenja, sa kapom postavljenom prema slici 61 možemo istokariti vanjski promjer prirubnice na kotu  $\Phi 1145$  mm, unutarnji promjer prirubnice na kotu  $\Phi 895$ , te poravnati naličje prirubnice. Pod poravnavanjem se misli se na tokarnje površinskog sloja odljeva do minimalne dubine koja je potrebna da se ukloni površinski sloj oksida tako da se dobije ravni i čisti sloj metala.

Zatim odljevak treba okrenuti kao bi se dobio lakši pristup licu prirubnice. Okrenuti odljevak se može pritezati za iste pakne koje su korištene u prijašnjoj fazi tokarenja ako one imaju odgovarajući zub i čeljusti za stezanje odljevaka u rupi. Ponovo pri pritezanju treba paziti na pravilnu centraciju odljeva.



Slika 62. Položaj kape u drugoj fazi tokarenja.

U drugoj fazi tokarimo lice prirubnice na debljinu od 45 mm, te radijus R15.

Obradeni odljevak se tada može ukloniti sa stroja i predati na izlaznu kontrolu. Nakon toga je potrebno opet temeljito očistiti radni prostor, te svu prikupljenu strugotinu nastalu obradom kape predati na skladište.

U tablici 3. je gruba procjena režima rada i vremena obrade odljeva. Ta procjena je ponajviše informativne prirode jer ne uzima u obzir specifične norme za pojedine operacije, te režime rada koje su u stanju ostvariti specifični strojevi.

br.	faza	parametri rada stroja	vrijeme
1	čišćenje radnog prostora		~30 min
2	priprema karusela za rad (dobava opreme iz skladišta te montiranje pakni na plan ploču)		~30 min
3	postavljanje, stezanje i centriranje odljeva		~15 min
4	postavljanje noža za uzdužno vanjsko tokarenje u suport		~ 1 min
5	vanjsko tokarenje prirubnice na $\Phi 1145$	posmak $s = 0,2$ mm dubina rezanja $a = 8$ mm brzina rezanja $v = 100$ m/min broj okretaja $n \sim 27$ °/min	~13 min
6	postavljanje noža za uzdužno unutarnje tokarenje		~1 min
7	unutarnje tokarenje prirubnice na $\Phi 895$	posmak $s = 0,2$ mm dubina rezanja $a = 8$ mm brzina rezanja $v = 100$ m/min broj okretaja $n \sim 35$ °/min	~11 min
8	postavljanje noža za čeonu tokarenje u suport		~1 min
9	čeonu poravnavanje naličja prirubnice	posmak $s = 0,2$ mm dubina rezanja $a = 4$ mm brzina rezanja $v = 120$ m/min broj okretaja $n \sim 33$ °/min	~42 min
10	preokretanje, stezanje i centriranje odljevka		~15 min
11	čeonu tokarenje prirubnice na debljinu od 45 mm	posmak $s = 0,2$ mm dubina rezanja $a = 4$ mm brzina rezanja $v = 120$ m/min broj okretaja $n \sim 33$ °/min	~32 min
12	postavljanje profilnog noža R15 u suport		~1 min
13	tokarenje radiusa R15	brzina rezanja $v = 100$ m/min broj okretaja $n \sim 33$ °/min	~3 min
14	skidanje odljeva sa stroja		~5 min
15	pospremanje opreme za rad		~10 min
16	sakupljanje strugotine		~30 min

Tablica 3 Radni režimi i vremena tokarenja.

Brzina je iskustveno odabrana za tokarenjem ISO6L 3232 K20 noževima bez podmazivanja i hlađenja emulzijom. Posmak ne bi smio biti veći od 0,2 milimetra za taj nož kako bi se mogla postići zahtjevna kvaliteta obrađene površine.

## **6 Greške nastale prilikom lijevanja**

Lijevanje je složeni postupak izrade materijala čiji uspjeh ovisi o velikom broju faktora koje je često teško kontrolirati. Zbog toga određen postotak odljevaka će uvijek imati prisutne greške. To ne mora uvijek nužno rezultirati škartiranjem takvog odljeva jer se dobar dio tih grešaka može popraviti. U ovom poglavlju će se napraviti pregled tipičnih grešaka koje mogu nastati, njihovih uzroka, te potencijalnih metoda sanacije.

### **Klasifikacija**

Ovisno o izgledu ljevačke pogreške padaju u jednu od sljedećih kategorija:

- A) metalne izrasline
- B) šupljine
- C) prekid kontinuiteta mase
- D) pogreške na površini odljeva
- E) nepotpun odljev
- F) netočne mjere ili oblik
- G) uključci i nepravilna struktura

U našem pregledu ćemo obraditi samo greške koje imaju veću vjerojatnost pojavljivanja pri lijevanju kape broskog vijaka iz aluminijsko-nikalne bronce.

### **Srh**

Srh spada u A grupu grešaka i redovita je pojava. Posljedica je neidealnog naližavanja, odnosno zračnosti, između elemenata kalupa, te između jezgre i kalupa. Metal koji prodire u te prostore tvori tanke metalne izrasline na površini odljeva.

Srh se lako uklanja prilikom čišćenja odljeva ručnim cirkularnim pilama i brusilicama.

### **Perle i kugle**

Perle i kugle su okrugle metalne izrasline malog promjera koje se pojavljuju na površini odljeva (A tip greške) ili u unutrašnjosti površinskog plinskoga mjehura (B tip greške). Posljedica su prevelike količine otopljenih plinova u talini.

Iako se kugle lako mogu odstraniti brušenjem, te navarivanjem ukoliko se radi o kugli u plinskom mjehuru, sama pojava kugli je indikacija taline sa previše otopljenih plinova, te samim time i puno ozbiljnijih grešaka u unutrašnjosti odljeva.

### **Plinski mjehuri i pore**

Ovo je greška B tipa i može se pojaviti u raznim intenzitetima, od pojedinačnih lokalnih mjehurića malih dimenzija, do velikog broja mjehura koji se rasprostiru kroz cijeli odljev. Plinski mjehuri su najčešće posljedica prevelike količine otopljenih plinova u talini. Uz to mogu nastati zbog razvijanja plinova iz pijeska ili kalupnog premaza zbog reakcije sa talinom na povišenoj temperaturi, ili zbog prekomjerne vlažnosti kalupa i premaza. Također mogući uzrok može biti usisavanje zraka u talinu pri lijevanju zbog nepravilne konstrukcije uljevnog sustava ili nepravilnog postupka ulijevanja.

Ti mjehuri se u pravilu pojavljuju ispod površine te nisu vidljivi prije strojne obrade odljeva ili ispitivanja ultrazvukom. U slučaju pojedinih mjehura manjih dimezija moguć je popravak navarivanjem, no u većini slučajeva cijeli odljevak će se morati škartirati.

### **Uključci troske**

Ova greške padaju pod grupu G i pojavljuje se u obliku listića ili grumen troske zarobljenih na površini ili unutrašnjosti odljeva. Posljedica su neadekvatnoga čišćenja šljake sa taline prije lijevanja, neadekvatnoga tretiranja taline sa sredstvima koje poboljšavaju segregaciju i flotaciju troske, te nepostojanja filtra za trosku u uljevnom sustavu.

U slučaju pojedinačnih uključaka odljevak se može popraviti navarivanjem, no u slučaju veće količine troske cijeli odljevak se mora škartirati.

### **Površinska šupljikavost**

Ova greška B tipa dolazi u obliku mjehurića na površini ili nekoliko milimetara ispod površine odljeva. Nastaje zbog previsoke vlage u pijesku ili premazu, ili zbog reakcije oksida taline sa materijalom premaza ili kalupa.

Ova greška se može sanirati uklanjanjem površinskog sloja odljevka ako je predviđen odgovarajući dodatak za strojnu obradu.

### **Vanjska usahlina**

Također greška B tipa dolazi u obliku udubljenja na gornjoj površini odljeva. Posljedica su stezanja materijala pri skrućivanju uslijed neadekvatnoga napajanja odljeva. Do toga može doći zbog premalih pojila, pre brzog skrućivanja pojila, ili ako smjer skrućivanja zatvori dotok taline iz pojila prije završetka skrućivanja cijelog odljeva.

Popravak nepravilno napajanog odljeva kape je u pravilu neisplativ te se cijeli komad škartira.

### **Unutarnje usahline i mikrousahline**

Greška B tipa koja se pojavljuje u unutrašnjosti odljeva. Ovisno o načinu skrućivanja (razlike temperature solidusa i likvidusa) materijali se skurčuju po glatkoj fronti, hrapavoj fronti ili kašasto. Aluminijska bronca ima relativno malu razliku između temperature početka i završetka skrućivanja, te će u slučaju nepravilnog napajanja dobivati unutarnje usahline u obliku većih šupljina umjesto spužvastih mikrousahlina koje nastaju pri kašastom i hrapavom skrućivanju.

Unutarnje usahline i mikroporoznosti nastaju u području odljevka koji se zadnji skrućuje (tipično dio odljeva sa najvećim modulom) ako taj dio odljeva nije direktno napajan iz pojila.

Otkrivanje unutarnjih usahlina nije uvijek lako budući da se one nalaze tipično u unutrašnjosti najdebljeg dijela odljeva. Najlakše se otkrivaju u slučaju mikroporoznosti kada stvaraju sloj razrjeđenog metala. Iako taj sloj često nije vidljiv golim okom on se lako otkriva ispitivanjem tekućim obojenim penetrantima. Ti se penetranti kapilarnim mehanizmima upijaju u razrjeđenju strukturu materijala, te nakon odgovarajućeg tretmana ostavljaju jasan trag područja u kojem je struktura materijala razrjeđenja. Odljevak sa takvom strukturom u pravilu nije nepropustan kad je izložen pritisku fluida pod tlakom.

Zbog načina skrućivanja nepravilno napajane kape propelera izrađene od aluminisno nikalne bronce u pravilu neće imati mikroporoznost već unutarnje usahline. Takve usahline najčešće neće imati utjecaja na nepropusnost odljeva te neće biti uočljive bez prerezivanja odljeva ili ispitivanja ultrazvukom.

### **Tople napukline**

Ova greška C tipa može nastati zbog naglih promjena debljine odljeva koje zbog različite brzine hlađenja uzrokuju unutarnje napetosti, ili pri stezanju odljeva oko vrlo krutih jezgri, hrapavih kalupa ili zapečenog pijeska. Materijal koji su krti su osobito skloni toplim napuklinama. Iako aluminisno nikalne bronce sa nižim postotkom aluminija na sobnoj temperaturi imaju dobro istezanje i nisu skloni pucanju, pri povišenoj temperaturi one postaju dosta krte. Zbog toga, i zbog opečenito velikog stezanja aluminijskih bronci, vjerojatnost pojave napuklina pri lijevanju kape je značajna.

Same napukline mogu biti raznih veličina i dubina. Pliće pukotine dubine od milimetar ili dva se lako saniraju brušenjem napuklog površinskog sloja. Dublje ali kraće lokalne pukotine se mogu popraviti navarivanjem. Za veće pukotine cijeli se odljev mora škartirati.

### **Hladan var**

Hladan var je greška C tipa koji se prepoznaje kao diskontinuitet mase gdje je jasno vidljiv spoj dvije neovisne struje metala koje nisu pravilno srasle. Njihov uzrok je nedovoljno visoka temperatura ulijevanja i/ili odveć sporo ulijevanje.

Hladni var je greška koja se ne može popraviti i cijeli odljev treba škartirati.

### **Krasta i brazda**

Greške D tipa koja nastaju kao ljuska metala vezana jednim rubom za odljevak. Nastaje zbog raslojavanja pješčanog kalupa uslijed kombinacije lokalne kondenzacijske zone u kalupu i toplinskog širenja kvarcnog pijeska. Raslojeni pijesak ostavlja brazdu u odljevu, dok metal koji prođe u otvor stvoren raslojavanjem kalupnog pijeska tvori ljusku, odnosno krastu.

Kraste se teško saniraju i komadi se obično moraju škartirati. Problem je bolje izbjeći pravilnim dodavanjem veziva u ljevački pijesak, dobrim miješanjem tog pijeska, korištenjem pijeska sa manjom vlažnosti i sa krupnijim zrnom, te smanjenjem toplinskog naprezanja pijeska bržim ulijevanjem taline.

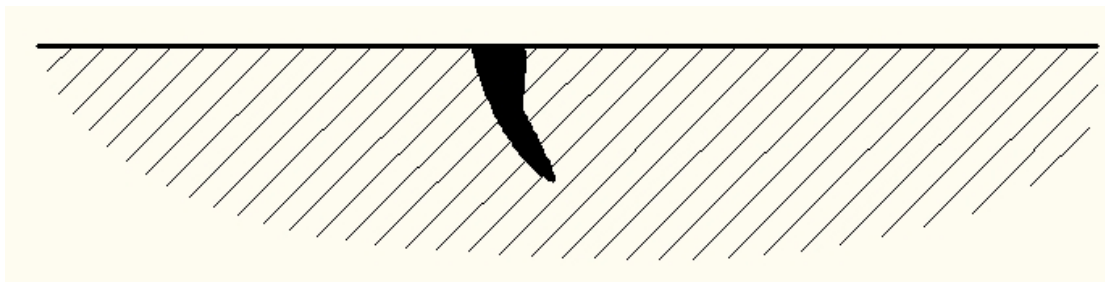
### **Nedolivenost**

Greška E tipa u kojoj određeni dio kalupa nije ispunjen talinom tako da je odljevak nepotpun. Uzrok tome može biti niska temperatura ulijevanja, nepravilno konstruiran uljevni sustav, zaštopani odušci u kalupu koji sprječavaju pravilan ispuh zraka i plinova iz kalupne šupljine.

Nedoliveni odljevak se mora škartirati.

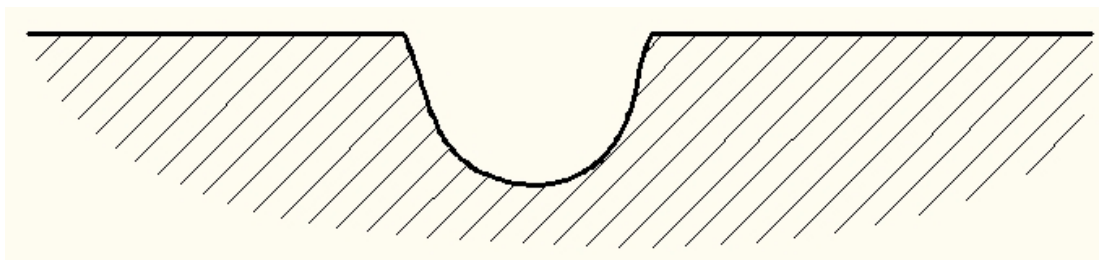
### **Popravak odljevka navarivanjem**

Popravak navarivanjem je najčešće korištena metoda popravka manjih površinskih grešaka u odljevu.



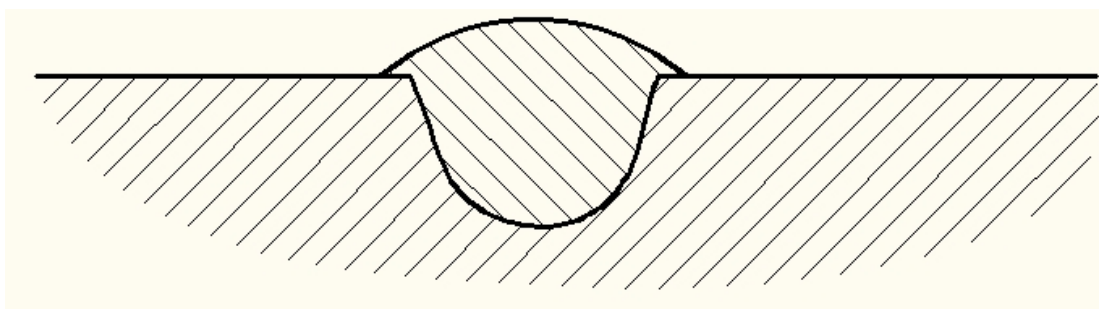
Slika 63. Primjer greške u odljevku

Prvi korak sanacije greške je čišćenje. Bilo da se radi o pukotini, plinskom mjehuriću ili uključku šljake, prvo se mora odstraniti sav strani materijal i okside iz područja greške. To se obavlja ručnom cirkularnom pilom ili bušilicom.



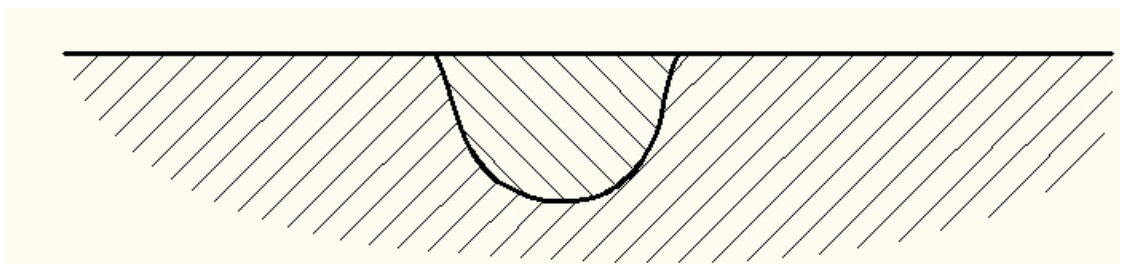
Slika 64. Očišćeno područje greške

Nakon čišćenja otvor u kojem je bila greška se ispunjava metalom navarivanjem MIG postupkom. Pri tome treba paziti da žica korištena pri navarivanju ima kemijski sastav koji odgovara materijalu odljeva kojeg popravljamo.



Slika 65. Površina odljeva nakon navarivanja metala

Konačno suvišak navarenog metala je potrebno prebrusiti.



Slika 67. Popravljena greška



## Literatura:

- [1] Miroslav Sambolek: Propulzija broda
- [2] Antun Gamulin, Stanislav Ružić: Otpor broda
- [3] Tehnička dokumentacija ljevaonice Strojar d.o.o. Bistra
- [4] Ljevački priručnik: Savez ljevača Hrvatske 1985 g.
- [5] Mile Galić: Proizvodnja metalnih odljevaka
- [6] Ljubomir Babić: Obrada materijala odvajanjem čestica